



UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona
Departamento de Proyectos de Ingeniería
Doctorado en Proyectos de Innovación Tecnológica en la Ingeniería del
Producto y Proceso

CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) CONGLOMERADOS CON YESO O ESCAYOLA, SU USO EN LA CONTRUCCIÓN

Tesis presentada por:

Francisco Javier González Madariaga

Para optar por el título de:

Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya

Director de la Tesis: **Dr. Joaquim Lloveras Macia**

Barcelona, diciembre del 2005

**CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) CONGLOMERADOS CON
YESO O ESCAYOLA, SU USO EN LA CONTRUCCIÓN**

Agradecimientos

Al arribar a los momentos finales de esta tesis es justo expresar mi gratitud a todos aquellos que de alguna manera han hecho posible que este proceso llegue a su conclusión:

Al Programa para el Mejoramiento del Personal Docente de la Secretaría de Educación Pública de México (PROMEP) del cual he recibido la beca UDG 375 que hizo posible nuestra estancia en Catalunya.

A nuestra Universidad de Guadalajara por la confianza con la que he sido distinguido al permitir el ausentarme de mis actividades docentes y de investigación durante un largo período. Por el apoyo que siempre he recibido de la Institución por parte de sus autoridades: de la Rectoría General del Sr. Rector José Trinidad Padilla y del Sr. Vicerrector Tonatíuh Bravo Padilla y de la Rectoría del Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño Mtro. Carlos Correa Ceseña. Agradezco los valiosos recursos económicos que se han sido invertidos en mi persona.

A mis compañeros docentes de la Universidad de Guadalajara por su apoyo en mi ausencia, de forma especial a mis amigos; los profesores Mtro. J. Ernesto Olivares, al Mtro. Héctor Flores Magón, y al Mtro. Alberto Rossa quienes me dispensaron su valiosa ayuda en múltiples ocasiones.

A todos los profesores del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universitat Politècnica de Catalunya, especialmente con los que tuve la fortuna de compartir sus conocimientos y me dispensaron con su atención y amistad.

Al Dr. Francesc Roure jefe del Laboratorio y al personal técnico del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona por las facilidades prestadas al facilitar sus instalaciones y asesoría para la realización de los ensayos de esta tesis.

Al Sr. Joan Ramón Rossell jefe del Laboratorio y al personal técnico del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Politècnica Universitaria, ambos laboratorios pertenecientes a la Universitat Politècnica de Catalunya, por su apoyo en la realización de las muestras y en la realización de algunos de los ensayos de resistencia de esta investigación.

A la Dra. Lourdes Campos del Laboratorio de Ingeniería Química de la UPC por facilitar sus instalaciones para la realización de los ensayos de Reacción al fuego.

A la empresa Applus en Cerdanyola Barcelona y en especial al Sr. Joaquim Alier por su cortesía en los ensayos de conductividad térmica.

Al Sr. Enric Fiestas de la empresa Reciclats BRAFIM S.A de Cerdanyola Barcelona y a su personal directivo por su amable donación de los materiales de EPS con los que se produjeron las muestras usadas en esta tesis.

A la empresa Knauf de Guixers, Solsona y a su Director el Sr. José Calvo y al Jefe de la Planta Sr. Joseph Plans por permitirnos visitar sus instalaciones y por sus útiles comentarios sobre los procesos de fabricación de la placa de yeso laminado.

Al Sr. Alejandro Matanza por su paciencia durante mi estancia en el Taller Mecánico del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la UPC.

A la Dra. María Lluïsa Maspoch, al Dr. Domènech Cucurull y al Dr. Francesc Roure por sus valiosos comentarios durante el desarrollo de la investigación y su lectura final de esta tesis.

Al Dr. Joaquim Lloveras por su apoyo durante mi estancia en el Programa Doctoral en Innovación Tecnológica en la Ingeniería del Producto y Proceso. También agradezco al Dr. Lloveras por su dirección y su paciencia durante la realización de esta tesis.

A mis compañeros del Programa Doctoral en Innovación Tecnológica en la Ingeniería del Producto y Proceso. Gracias amigos, les deseo la mejor suerte.

A Ivonne mi esposa, por su valiosísimo y desinteresado esfuerzo en el diseño, redacción e innumerables correcciones de este documento. Sin su aguda inteligencia y su cariño, esta tesis no hubiese llegado a concretarse de la manera como se ha dado.

A todos, ¡Mil gracias!

Dedicatoria

A la memoria de mi padre

A mi madre, apoyo a través de la distancia.

A mis hijos Paco y Fer compañeros de travesía, por desprenderse de sus mundos dos veces.

A Ivonne mi esposa, compañera sin condiciones y de ánimo inagotable. Este trabajo es tuyo.

Glosario de la tesis

Conjunto de trabajo	Es un grupo de mezclas similares en las proporciones de sus componentes o procesos análogos, que se unen para ordenar la información relativa a su análisis de resultados.
Densidad laminar	Cantidad total de la masa de una placa en función a su espesor, expresado en kg/m^2 . También se define como la Masa por unidad de Superficie.
Grupo de selección	Mezclas candidatas en esta tesis para su aplicación como placa o como panel, que se ubican dentro de los rangos seleccionados de yeso-escayola, agua y residuos de EPS y que son sometidas a un proceso de evaluación y selección.
Mezcla	Agrupación de residuos de EPS conglomerados con yeso o escayola y agua que después de amasados forman un cuerpo endurecido para su aplicación como panel o como placa.
Panel	Plancha de yeso o escayola conglomerada con residuos molidos de EPS con aplicación similar a un panel de EPS virgen tipo III, densidad de $15 \text{ kg}/\text{m}^3$.
Placa	Placa de yeso o escayola conglomerada con residuos molidos de EPS con aplicación similar a una placa de yeso laminado tipo estándar (STD), con un espesor de 12,5 mm, densidad de $10 \text{ kg}/\text{m}^3$.
Porcentaje de las fórmulas	Todos los porcentajes indicados en las fórmulas son en peso, con referencia a la cantidad en peso seco del yeso o escayola usados para la elaboración de las mezclas, considerando que la cantidad del conglomerante siempre es del 100%.
Probeta	Son muestras de placas o de paneles de residuos conglomerados con yeso o escayola que se han fabricado para su ensayo y caracterización. En este trabajo se maneja de manera indistinta los términos <i>probeta</i> y <i>muestra</i> .
Probeta comercial	Son muestras de placas de yeso laminado estándar comercial y paneles de EPS virgen comercial que se ensayan sólo como elementos de comparación con los materiales propuestos en esta tesis.
Probeta de referencia	Es una probeta elaborada con las mismas proporciones de yeso-agua de los nuevos materiales propuestos en esta tesis, pero que no contienen residuos molidos de EPS y que se designa con una letra R.
Probetas de panel	Son muestras de panel elaborado con Escayola E-35, agua y residuos de EPS que se elaboran en distintas proporciones en peso con relación al peso seco de la escayola. Es la muestra del material propuesto es esta tesis para la aplicación como panel aislante térmico.
Probetas de placa	Son muestras de placa de yeso o escayola, agua y residuos molidos de EPS que se elaboran con distintos porcentajes en peso con relación al peso seco del conglomerante. Es la muestra del material propuesto para la aplicación como placa para elementos constructivos.

Glosario

Serie Ordenación de elementos en función de sus características. Aquí se aplica para un grupo de probetas elaboradas con una misma mezcla y que comparten la misma fórmula.

Siglas usadas en la tesis

A	Agua
AN	Almidón nativo en polvo
C1	Residuo cortado de espuma de EPS, cubo de 1 cm
C2	Residuo cortado de espuma de EPS, cubo de 0,7 cm
C3	Tira cortada de espuma de EPS, 1 x 1 x 10 cm
C4	Tira cortada de espuma de EPS, 0,7 x 0,7 x 12 cm
C5	Residuos cortado de espuma de EPS, cubo de 1,5 cm
E	Escayola E-35
E 100+A 120	Escayola 100% + Agua 120%
E 100+A 120+ MG 3	Escayola 100% + Agua 120% + residuo molido grueso de EPS al 3%
E 100+A 120+ MG 6,4	Escayola 100% + Agua 120% + residuo molido grueso de EPS al 6,4%
E 100+ A 200+ MG 8,1	Escayola 100% + Agua 200% + residuo molido grueso de EPS al 8,1%
E 100+A 300+ MG 14,4	Escayola 100% + Agua 300% + residuo molido grueso de EPS al 14,4%
E 100+A 500+ MG 35,1	Escayola 100% + Agua 500% + residuo molido grueso de EPS al 35,1%
FV	Velo de Fibra de Vidrio
MF	Molido fino de residuos de EPS compuesto de perlas completas hasta 4 mm de diámetro y partículas propias de la molienda.
MG	Molido grueso de residuos de EPS compuesto de perlas completas hasta 6 mm de diámetro y partículas propias de la molienda.
PB	Papel Bond, 0,08 kg/m ²
PC	Papel Cartón gris reciclado, espesor 0,45 mm
PK	Papel Kraft, 0,1 kg/m ²
R	Letra que designa a una probeta de referencia
R (42-44)	Probeta de referencia correspondiente a la fórmula YC 100+A 120
R (45)	Probeta de referencia correspondiente a la fórmula E 100+ A 120

Siglas usadas en la tesis

R (49)	Probeta de referencia correspondiente a la fórmula YR 100+A 80
Y	Yeso
YC	Yeso Controlado o lento
YC 100+A 120	Yeso Controlado 100% + Agua 120%
YC 100+A 120 +MG 2	Yeso Controlado 100% + Agua 120% + residuo molido grueso de EPS al 2%
YC 100+A 120 +MG 3	Yeso Controlado 100% + Agua 120% + residuo molido grueso de EPS al 3%
YR	Yeso Rápido o acelerado
YR 100+A 80	Yeso Rápido 100% + Agua 80%
YR 100 + A 80 +MG 1,6	Yeso Rápido 100% + Agua 80% + residuo molido grueso de EPS al 1,6%

Siglas usuales

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ANARPLA	Asociación Nacional de Recicladores de Plástico
ANAPE	Asociación Nacional de Poliestireno Expandido
APME	Association of Plastics Manufacturers in Europe
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOE	Boletín Oficial del Estado
DFA	Design for Manufacturing and Assembly
DFD	Design for Disassembly
DFE	Design for Environment
DFR	Design for Recycling
DfX	Design for X
EN	Norma Europea
EO	Europa Occidental
EPA	Environmental Protection Agency
EPS	Expanded Polystyrene. (Poliestireno Expandido)
GRS	Gestión de Residuos Sólidos
HDPE	Polietileno de alta densidad
ISO	International Organization for Standardization
LCD	Life Cycle Design
LCE	Life Cycle Engineering
LDPE	Polietileno de baja densidad
PCD	Policarbonamida
PCS	Poder Calórico Superior
PET	Polietilen tereftalato
PIR	Poliisocianurato

Siglas usuales

P+L	Producción más Limpia
PMB	Producto Mundial Bruto
PMMA	Polimetacrilato de metilo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PP	Polipropileno
PUR	Poliuretaro Rígido
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de Vinilo
PYL	Placa de Yeso Laminado
RM	Residuos Municipales
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SBI	Ensayo Single Burning Item
SPI	Society of the Plastics Industry
UF	Urea formaldehído
UNE	Una Norma Española, publicadas por AENOR
UNE-EN	Norma Europea publicada por el CEN, que adopta España mediante la correspondiente norma UNE
UNE-EN-ISO	Norma Internacional que Europa acepta y publica, que a su vez, adopta España mediante la correspondiente norma UNE
UPC	Universidad Politécnica de Cataluña
WCED	World Comission on Environment and Development

Resumen de la tesis

RESUMEN

En el trabajo de Tesis se exponen el proceso y los resultados de una investigación que nace de las vivencias y las inquietudes de un diseñador industrial preocupado por el deterioro ambiental que vive el planeta. Esta Tesis se dirige no sólo a la problemática sino también a las oportunidades que hay en los residuos de poliestireno expandido (EPS) en los países de desarrollo tecnológico avanzado.

Se ha planteado el trabajo desde una perspectiva interdisciplinaria entre la Ingeniería y el Diseño, donde se busca atacar de una forma novedosa el reciclaje de residuos de EPS al alargar su ciclo de vida, aprovechando las características útiles que aún tienen al momento de ser desechados después de su uso que generalmente es de corta duración. Se propone la aplicación de residuos de poliestireno expandido en nuevos productos de duración más larga, como son los elementos para la construcción.

En esta investigación ha sido prioritaria la demostración de la Hipótesis que señala que es posible la fabricación de elementos constructivos, partiendo de residuos de espumas de EPS conglomeradas con yeso y escayola; estos últimos son materiales abundantes en la naturaleza y ampliamente conocidos en la construcción. Otra hipótesis indica que el aprovechamiento de los residuos de espuma de EPS conglomerados se puede hacer a través de procesos de baja complejidad.

Los materiales que se proponen y los elementos con ellos fabricados, deben de poseer características de funcionalidad y apariencia compatibles principalmente con las necesidades de la construcción; de aquí que una propuesta de recuperación de las espumas y su aplicación exitosa en ese campo requiere del conocimiento de las posibilidades técnicas más importantes de los nuevos materiales. En esta investigación se busca atender la demanda de información sobre los nuevos materiales con un extenso trabajo de producción de muestras y su posterior ensayo en laboratorios de resistencia de materiales.

Investigación documental

La Metodología aplicada en la Tesis señala como el comienzo de los trabajos, una investigación documental amplia acerca de la naturaleza de los materiales que se buscan reciclar, sus orígenes y aplicaciones como materiales vírgenes y las trayectorias y los destinos que siguen actualmente esas espumas una vez que llegan a los flujos de residuos. Además se ha investigado acerca de los conglomerantes de yeso y la escayola, su disponibilidad en el mundo, su uso en algunos productos parecidos y se han revisado diversos trabajos publicados por otros investigadores en el mismo tema o temas cercanos.

También se ha atendido el estado que guarda la técnica para la gestión de residuos; con especial interés se han observado las técnicas para el reciclaje de materiales plásticos y del EPS.

La investigación ha participado también de temas como las formas de uso, características y producción de los materiales comerciales de aislamiento más comunes. Además se ha puesto especial atención tanto a las formas tradicionales de fabricación de productos de yeso y escayola, como a los sistemas altamente automatizados de producción de las placas

de yeso laminado para la construcción. Todos estos conocimientos mostraron su utilidad como elementos de comparación con los nuevos materiales a lo largo del trabajo de tesis.

Al mismo tiempo la investigación permitió definir el conjunto de normas relativas a las aplicaciones de interés. En el trabajo se privilegió el uso de las normas españolas aunque también se hizo uso ocasionalmente de normas europeas y de los Estados Unidos.

Una vez establecido un cuerpo de información considerable acerca del tema, fue posible proponer para su evaluación dos aplicaciones para los materiales compuestos. Estas aplicaciones con varias fórmulas cada una, se han ensayado más adelante y son:

- Una *placa constructiva* de usos similares a la placa de yeso estándar. Las placas propuestas están fabricadas de varios tipos de conglomerantes de yeso o escayola con inclusiones de residuos de espuma de EPS y recubiertas en su cara y dorso con cartón. Además, el conglomerante está formulado de manera que presenta una estructura porosa y ligera, lo que les confieren a las placas propiedades originales y de interés para la construcción. Se les designa **placa** en esta tesis.
- Un *panel constructivo de aislamiento térmico* de usos similares a los paneles de espuma virgen de EPS en la construcción. El panel está formado por altas proporciones de residuos acondicionados de espuma de EPS conglomerados con yeso o escayola y están formuladas de tal manera que son materiales porosos y ligeros. Se les designa **panel** en esta tesis.

Trabajos previos a la investigación

La metodología diseñada para la Tesis muestra una notable tendencia hacia la labor experimental. Los primeros trabajos que se desarrollaron fueron los *Trabajos previos a la investigación*, que tienen como objetivo suministrar información particular y concreta para la planificación de los experimentos posteriores.

Los trabajos previos produjeron la siguiente información:

- Generalidades acerca de los procesos de amasado e impregnación de los residuos cortados de EPS en mezclas con escayola. Se obtuvieron los primeros datos acerca de proporciones de los componentes de algunas mezclas, viscosidad de las pastas, tiempos de fraguado y endurecimiento, así como de las densidades aparentes obtenidas.
- Experimentación de las técnicas disponibles para el corte de residuos de EPS.
- Características generales de residuos de EPS cortados.

Una opción al manejo de residuos cortados durante la investigación fue la de usar *residuos molidos*. El programa ECO-EPS implementado por los fabricantes del sector consiste en la recuperación y molienda de algunos residuos de EPS colectados por los propios empresarios; los residuos molidos de espuma tienen diferentes formas de reciclaje entre las que se pueden mencionar su integración como carga de nuevos productos y de aligerante de elementos constructivos de arcilla.

Durante la etapa de Trabajos previos y gracias a un lote de muestras donadas por el programa ECO-EPS, se desarrolló un experimento que permitió establecer un perfil de los tipos y tamaños de las perlas y partículas de residuos molidos presentes en la muestra y su composición por tamaños. La información fue de especial utilidad durante los análisis de los ensayos de las mezclas que se practicaron posteriormente.

Etapa experimental de manejo y selección de mezclas

Una vez conocidos los potenciales materiales a estudiar, se procedió a la *Etapa experimental de manejo y selección de mezclas*. La etapa comenzó con el diseño de un árbol de combinaciones de los diferentes materiales a experimentar; posteriormente las combinaciones más representativas fueron ordenadas por la similitud de sus objetivos individuales y organizadas en *conjuntos de trabajo* que contienen las fórmulas específicas para cada mezcla de materiales. Finalmente se produjo una muestra de cada mezcla incluida en cada grupo de trabajo las cuales sumaron 68 piezas. Para la interpretación de las fórmulas utilizadas durante la tesis, se ha diseñado una nomenclatura propia que se detalla en el apartado 5.1.1.3.a para las fórmulas de la etapa de experimentación y en el apartado 6.1.3.1, para la etapa de ensayos.

Dada la gran cantidad de las muestras fabricadas, estas fueron sometidas a un proceso de selección compuesto de dos evaluaciones sucesivas; el proceso permitió descartar las mezclas con características menos atractivas; entre ellas se descartó a las mezclas que contienen residuos cortados de EPS. De las evaluaciones se obtuvieron dos nuevos grupos de trabajo conteniendo cuatro mezclas cada uno que se consideraron las mejores candidatas para cada aplicación de placa y de panel.

De acuerdo a las 8 fórmulas seleccionadas se fabricó una serie de muestras de cada una para su posterior ensayo de acuerdo a las Normas españolas, Europeas o Norteamericanas de:

- Placas de yeso laminado estándar
- Paneles o planchas de espuma de EPS

Además de las muestras con residuos de EPS, se fabricaron dos grupos de muestras que cumplieron como materiales de comparación. Estos grupos fueron:

- Muestras fabricadas con las mismas fórmulas que aquellas seleccionadas salvo que no contienen residuos de EPS. Estas muestras se denominaron *Probetas de referencia (R)*.
- Muestras de materiales estándar o comerciales de: placa de yeso laminado y panel de EPS. Estas muestras se denominan *Probetas estándar o comercial*.

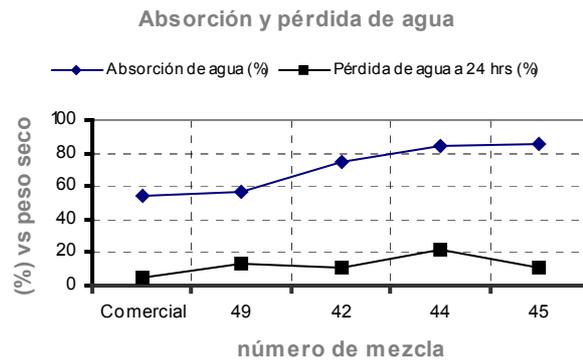
Todas las probetas según su aplicación fueron sometidas a los ensayos cuyos resultados se resumen como sigue:

*Aplicación de usos similares a la **placa** de yeso estándar:*

- Ensayo de absorción de agua por inmersión total de placa

La resistencia de los conglomerantes usados tiene relación con la presencia de agua en su estructura porosa, de aquí la importancia de este ensayo en la investigación.

El ensayo comprobó la mayor tendencia a absorber agua de los nuevos materiales comparada con la absorción de las probetas de referencia (25% o más) y las comerciales (2,5% o más). Por otra parte la migración del agua absorbida hacia el exterior se da más rápidamente en los nuevos materiales, lo cual puede representar una ventaja para la recuperación de sus propiedades de resistencia cuando ha terminado la inmersión (ver gráfica R1).

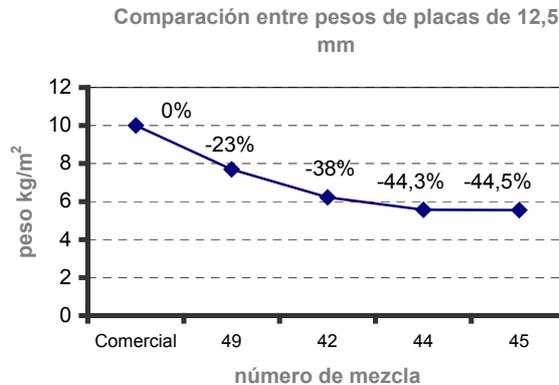


Gráfica R1 Porcentaje de absorción y pérdida de agua a 24 hrs de placas

- Ensayo de la determinación de la densidad laminar de placa

Se confirmó que es posible disminuir la densidad laminar en productos similares a placa de yeso laminado a través del manejo de mezclas ricas en agua o a través de la integración de residuos molidos de EPS.

El ensayo confirmó que a mayor proporción de agua en la mezcla y de residuos de EPS, corresponde una disminución de la densidad de la mezcla que se trate. De los resultados se han mostrado pérdidas de densidad que oscilan entre el 44,5% y el 23,1% entre los materiales que contienen residuos molidos de espuma y la placa de yeso estándar comercial (gráfica R2).

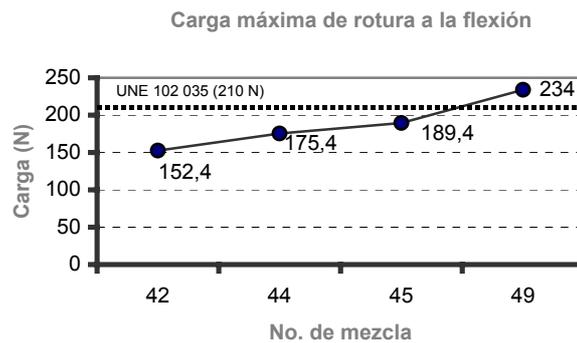


Gráfica R2 Comparación entre pesos de placas con 12,5 mm de espesor

- Ensayo de flexión de placa

El ensayo evidenció la disminución de los valores de carga máxima a la flexión que experimentan los cuerpos de yeso o escayola cuando se han formulado con una alta proporción de agua o se les ha agregado con residuos molidos de EPS, o cuando suceden los dos casos.

De las probetas formuladas con residuos de EPS, la mezcla seleccionada número 49 supera con 11% el mínimo requerido por la Norma correspondiente a placa de yeso laminado (210 N). De las otras mezclas, dos logran acercarse al 90 y 83% del valor requerido (ver gráfica R3).



Gráfica R3 Carga máxima de rotura del ensayo de flexión de placas

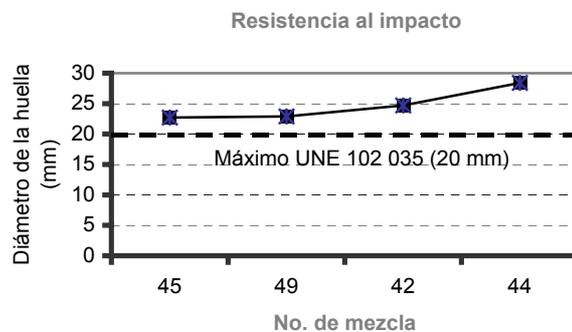
- Ensayo de reacción al fuego de placa

El ensayo evidenció las conductas positivas de reacción al fuego de los materiales con residuos de EPS en las proporciones que se manejan aquí. De esta manera en la tesis se proponen nuevos materiales de interés para la construcción por su reacción al fuego. Esta mejoría es producto de la naturaleza del conglomerante, la alta porosidad que resulta de su formulación y la forma como se da la combustión en el EPS que se produce de forma aislada al encontrarse envuelta en conglomerante y que, en última instancia, al consumirse deja en el cuerpo de yeso o escayola un nuevo poro que puede cooperar al mejor comportamiento al fuego de la placa en la que participa.

- Ensayo de resistencia al impacto de placa

De la comparación de los tres grupos de materiales durante el ensayo, los formulados con residuos de EPS son los más débiles al impacto. La prueba que consistió en la medición de la huella producida por la caída de una bola de acero sobre la cara de la probeta, señaló que las mezclas con residuos de EPS mostraron huellas que exceden hasta en un 15% a los diámetros permitidos en la Norma Española de Placas de yeso laminado (ver gráfica R4).

Un factor que se evidenció en las dimensiones y formas de las huellas sobre materiales con residuos de EPS durante el ensayo, fue la heterogeneidad en la distribución de los residuos en la probeta y que es resultado probablemente de su producción artesanal.

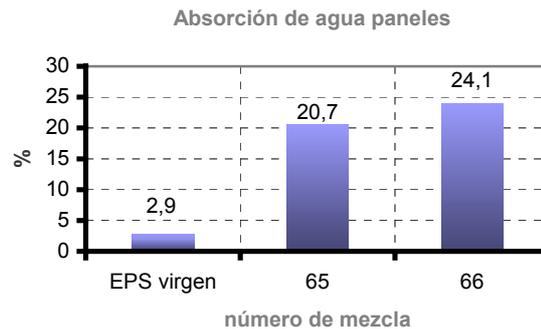


Gráfica R4 Diámetro de huella (mm) del ensayo de resistencia al impacto de placas
Aplicación de usos similares al **panel** de espuma de EPS:

- Ensayo de absorción de agua por inmersión total de panel

El ensayo confirmó la mayor tendencia a absorber agua de los nuevos materiales comparados con los materiales vírgenes de EPS, lo cual resulta previsible dada la estructura de un material compuesto y la estructura de un material homogéneo.

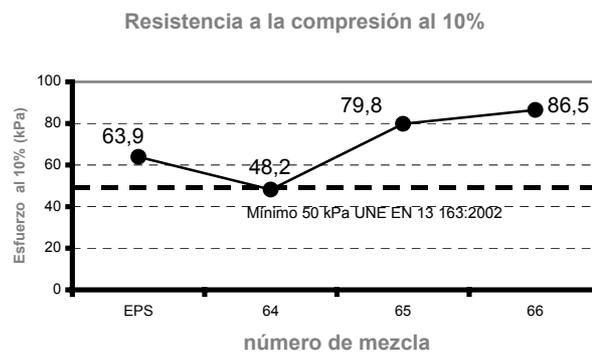
Los ensayos evidenciaron la tendencia a la pérdida de resistencia mecánica del conglomerante de escayola, además de su propensión a disolverse durante una inmersión prolongada. Esta última característica obligó a descartar a algunas mezclas ensayadas (gráfica R5).



Gráfica R5 Porcentaje de absorción de agua de las mezclas ensayadas de panel

- Ensayo de compresión de panel

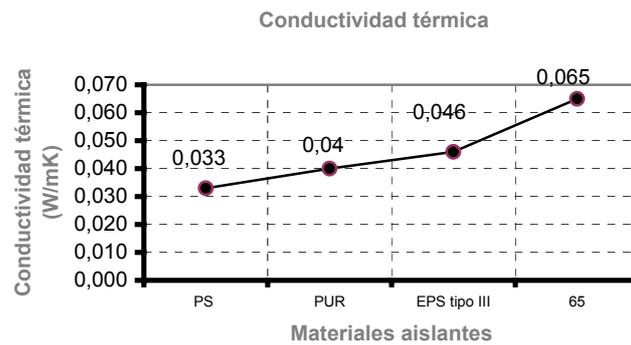
El ensayo evidenció la mejor resistencia a la compresión (hasta un 66% más) de los nuevos materiales sobre la del material virgen (EPS tipo III). Este comportamiento se puede explicar por la presencia del conglomerante de escayola que aporta a la mezcla sus características a este tipo de esfuerzos (gráfica R6).



Gráfica R6 Resistencia a la compresión de las mezclas ensayadas de panel

- Ensayo de conductividad térmica de panel

Los resultados del ensayo indican que la mezcla con las mejores características generales ofrece una conductividad térmica entre 0,063 – 0,067 W/mK (gráfica R7) que corresponde a 1,4 – 2,1 veces la conductividad declarada por el fabricante de EPS de baja y media densidad (0,030 – 0,046 W/mK). Esta conductividad, aunque mayor en los nuevos materiales, puede resultar atractiva en aplicaciones de construcción donde las exigencias térmicas son de menor dimensión.

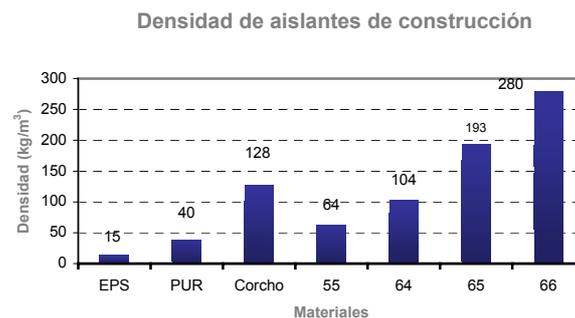


Gráfica R7 Conductividad térmica de algunos materiales aislantes

- Ensayo de densidad aparente de panel

Los resultados indican que se puede obtener una disminución de la densidad de los nuevos materiales en comparación de los materiales de referencia, sin embargo no puede esperarse una menor densidad de la espuma virgen (gráfica R8).

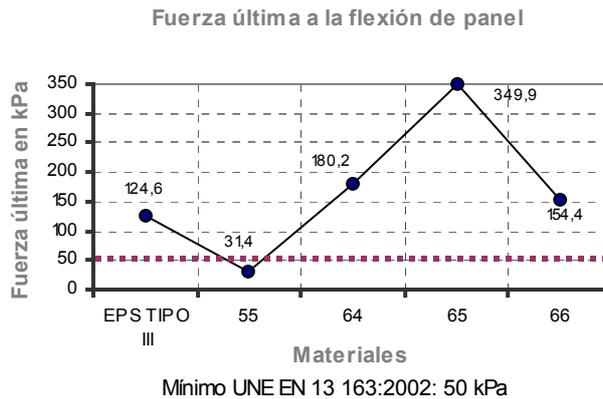
El ensayo ha mostrado que todas las probetas de los nuevos materiales tienen densidades notoriamente mayores que las de las espumas vírgenes; estas proporciones comienzan con 4 veces más que el EPS.



Gráfica R8 Densidad de materiales aislantes usados en la construcción y de las mezclas ensayadas de panel

- Ensayo de flexión de panel

Durante el ensayo los nuevos materiales arrojaron datos donde 3 de las 4 mezclas de nuevos materiales superan con facilidad los mínimos marcados por la Norma para EPS virgen; esos mismos valores pueden llegar a ser en algunas mezclas hasta 2,7 veces superiores a los de la espuma. Sin embargo durante la observación de los desplazamientos del ensayo se evidencia que éstos son menores en los nuevos materiales (ver gráfica R9).



Grafica R9 Fuerza última a la flexión en kPa de paneles ensayados

- Ensayo de reacción al fuego de panel

El ensayo mostró conductas positivas de reacción al fuego de los nuevos materiales en comparación con los materiales comerciales y los de referencia. Se ha evidenciado que los nuevos materiales se consumen si son sometidos a una llama constante pero no la sostienen ni la promueven, ni producen humo, ni depositan gotas encendidas.

Los ensayos han aportado información importante que permite acercarse tanto a las ventajas como a las desventajas de los materiales y sus aplicaciones estudiadas. Los resultados apuntan hacia las buenas posibilidades de los materiales para su uso, pero también señalan inconvenientes que habrán de ser tomadas en cuenta durante su posible utilización.

Se comienza por señalar como primera ventaja, que los materiales con las que están fabricados los compuestos proceden de residuos de espumas de EPS y que han sido acondicionadas con procesos simples de molienda. Por su parte, el yeso y escayola empleados en las mezclas son materiales abundantes en la naturaleza. Otro argumento a favor de estos conglomerantes es su baja temperatura de calcinación (1200 kW/h) que se puede reflejar en un menor consumo de combustibles, comparado por ejemplo con el cemento Pórtland (2400 kW/h) [COBUR89] [VILLAN01].

Los materiales de interés muestran algunas desventajas contra otros materiales comerciales; también se puede decir que esas desventajas pueden ser disminuidas y hasta eliminadas a través de la inclusión de aditivos o refuerzos en los materiales propuestos.

Conclusiones de las aplicaciones de los materiales en elementos de uso similar a las placas de yeso estándar.

Una ventaja principal de los nuevos materiales de placa está en su ligereza, donde una placa de 12,5 mm de uno de los nuevos materiales tiene un peso de hasta 5,55 kg/m² mientras una placa comercial tiene su peso entre 9,8 y 10 kg/m². Esto facilita su manejo en producción y almacén así como también su traslado hacia el lugar de uso e instalación en obra, lo que permite el ahorro de energía que puede traducirse en un beneficio medioambiental y que se añade al hecho del uso de materiales reciclados.

Los ensayo han confirmado las buenas características de reacción al fuego de los materiales propuestos, lo que ofrece una opción válida y atractiva para aplicaciones de construcción interior con mayor riesgo de incendio y donde la placa de yeso estándar puede resultar excesivamente pesada.

En varias de las comparaciones entre las resistencias mecánicas de las placas estándar, las placas de referencia y las placas fabricadas con residuos de espuma integrados se observa un mejor desempeño de los materiales comerciales. Se puede explicar que la pérdida de resistencia de los nuevos materiales producto de la rica proporción de agua empleada en la preparación de las mezclas y a la utilización de residuos de EPS, que resulta en una estructura ligera pero de alta porosidad y por ello más débil.

Del grupo de ensayos aplicados a probetas de placas, se confirma que los nuevos materiales son utilizables en aplicaciones similares pero de menor exigencia que los usos comunes de las placas estándar de yeso laminado. Dada la tendencia del material a absorber agua y con ello perder propiedades de resistencia mecánica, los mejores resultados se pueden obtener en recubrimientos aligerados de muros planos interiores a resguardo de la lluvia y de la humedad excesiva.

También, con la información procedente de los ensayos es posible proponer otras aplicaciones a estudiar en futuras investigaciones, como particiones interiores, para lo cual se pueden adosar las placas entre sí y lograr un producto de mayor resistencia.

Conclusiones de las aplicaciones de los materiales en elementos de uso similar a los paneles de espuma de EPS.

A lo largo de los ensayos se han establecido comparaciones de comportamientos entre las probetas de espuma virgen de EPS y las probetas de fabricación propia con los materiales de residuos de espuma acondicionados y conglomerados.

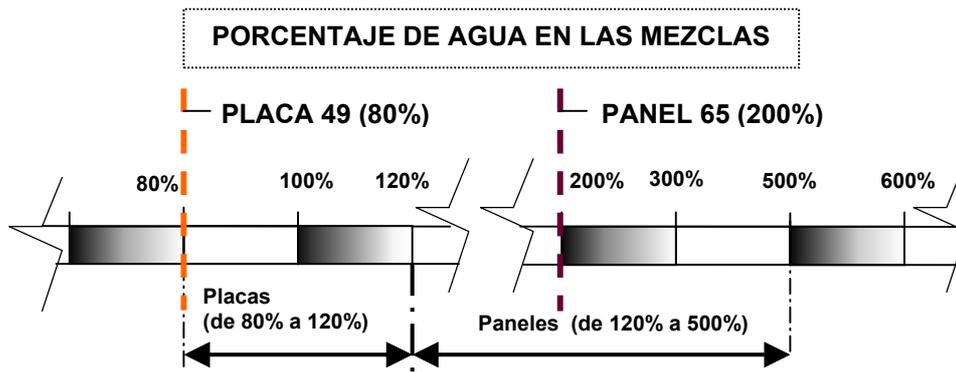
En varios de los resultados se observa un mejor desempeño de los materiales homogéneos que el de los materiales compuestos. Se puede señalar que los nuevos materiales son útiles en la construcción como recubrimientos verticales rectos para muros interiores con demandas de aislamiento menos exigentes, debido a que sus valores de conductividad térmica son mayores que los de la espuma de EPS.

Los paneles de materiales compuestos son atractivos en la construcción para usarse como recubrimientos de muros con acabados de protección mínimos sobre su cara visible, como son un enlucido delgado con pintura o con un recubrimiento de papel. Del uso anteriormente descrito se deduce de los ensayos practicados a los nuevos materiales, que éstos han mostrado conductas de resistencia a la compresión y de reacción al fuego superiores a la de la espuma virgen y que permiten ser una opción para ser instaladas sobre muros interiores.

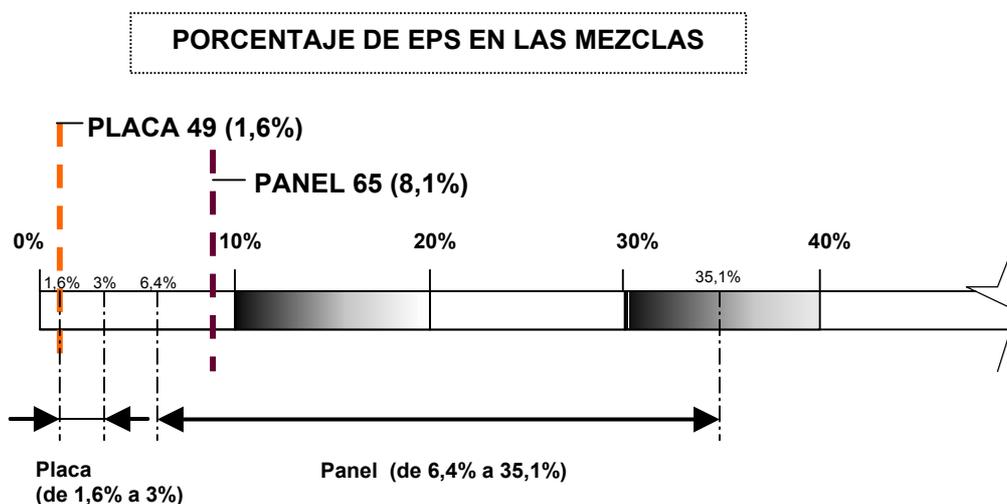
Como conclusiones finales del trabajo de tesis se señala que se han cumplido los objetivos planteados al principio de la investigación:

Las figuras R10 y R11 muestran las proporciones de los componentes que resultaron de mayor interés para las mezclas ensayadas. Para la placa, la proporción de agua de amasado osciló entre 80% a 120% en peso y para los residuos molidos de EPS entre 1,6% y 3% en peso, considerando la cantidad usada del yeso como 100%. Para la mezcla seleccionada número 49, la fórmula contiene: Yeso Rápido 100% + 80% de agua + 1,6% en peso de residuo molido grueso de EPS (YR 100+A 80+MG 1,6) (gráficas R10 y R11).

Los paneles ensayados se ubicaron entre 120% y 500% de agua de amasado en peso, con una relación de residuos molidos de EPS, entre 6,4% y 35,1% en peso. Para el panel seleccionado número 65, la fórmula es: Escayola 100% + 200% de agua + 8,1% de residuo molido grueso de EPS (E 100+A 200+MG 8,1) (gráficas R10 y R11).



Gráfica R10 Proporción de agua utilizada con relación al yeso o escayola para la preparación de las mezclas de placas y paneles seleccionados



Gráfica R11 Proporción de residuos de EPS utilizados con relación al yeso o escayola para la preparación de las mezclas de placas y paneles seleccionados

Hay que considerar que cuando se mencione la proporción de agua y de residuos de EPS en una mezcla, siempre está en relación directa con el yeso o escayola usado en una fórmula, aunque éstos no se mencionen en todos los casos, es decir, *todas las mezclas propuestas en esta tesis tienen tres componentes básicos: yeso o escayola, agua y residuos de EPS en distintas proporciones según la propuesta que se trate y las cantidades siempre se indican en porcentaje con relación al peso seco del yeso o escayola.*

Se ha mostrado que las aplicaciones propuestas en esta tesis son una alternativa para el reciclaje de residuos de espumas de EPS y para disminuir los volúmenes o postergar la llegada de las espumas a los vertederos.

Se ha mostrado que los materiales que contienen residuos acondicionados de EPS con atención a sus desventajas y con las debidas modificaciones, pueden ser aprovechados para la fabricación de elementos constructivos como los que se han señalado a lo largo de la investigación.

Se ha logrado la propuesta de productos alternativos para la construcción que pueden fabricarse con procesos simples.

Se ha logrado presentar una propuesta de diseño industrial mediante la realización de un trabajo multidisciplinario, que busca cooperar a la búsqueda de soluciones a problemas sociales importantes, como es en este caso, el de los residuos de espumas de plástico.

Anexos

Este trabajo se encuentra acompañado de cuatro anexos, los tres primeros impresos y el cuarto grabado en disco CD:

- Anexo A.1 El poliestireno expandido (EPS)
- Anexo A.2 Perfil técnico del yeso
- Anexo A.3 Avances para otras aplicaciones: Pastas
- Anexo A.4 Información Gráfica

Avances para otras aplicaciones: Pastas

En base a los datos obtenidos a lo largo de los ensayos de placa y panel se determinó que varias de las mezclas empleadas son susceptibles de ser aprovechadas en otras aplicaciones que pueden ser motivo de investigaciones posteriores (Anexo A3). La aplicación de las mezclas en pastas para la construcción, queda fuera de los alcances de la tesis, pero dada su cercanía al tema de la misma, se decidió efectuar algunas pruebas a esas mezclas sin una aplicación determinada de antemano.

Durante los ensayos se establecieron comparaciones entre los comportamientos de varias mezclas que contienen residuos de EPS y materiales de referencia fabricados con la misma fórmula pero que no contiene residuos de espuma.

En los ensayos se confirma que es posible obtener pastas de yeso o escayola para la construcción con una densidad aparente muy baja, comparadas inclusive contra materiales comerciales aligerados por otros medios como la perlita o el yeso aireado. Sin embargo, los ensayos señalan también una pérdida sustancial de resistencia mecánica de las mezclas ensayadas, en comparación con los valores de otros conglomerados de yeso o escayola con proporciones menores de agua y sin residuos de EPS.

Las aplicaciones de construcción donde mejor se pueden aprovechar las mezclas propuestas son pastas para guarnecidos o pastas para revestimientos gruesos, a los cuales se les dará acabado con un enlucido fino. Debido a la tendencia de los nuevos materiales a absorber agua, su uso habrá de darse en el interiores.

Anexo A4 Información gráfica.

El Anexo A4 consiste en un disco compacto que acompaña al documento de Tesis y contiene 340 fotografías seleccionadas por su interés, de entre todas las imágenes disponibles de la Memoria Gráfica de esta Investigación.

Los archivos del disco están organizados de la siguiente manera:

1. Residuos de EPS

Muestra fotografías de detalles de residuos de EPS cortados en diferentes formas y de residuos molidos de EPS, que en etapas posteriores de la investigación se usaron como materiales para la fabricación de diferentes probetas.

2. Probetas de la Primera Etapa Experimental

Contiene fotografías acerca de la fabricación de algunas de las probetas que posteriormente participaron en el proceso de selección. También se exponen vistas de las probetas más interesantes y un grupo de cortes de esas probetas (Capítulo 5).

3. Probetas de placas y paneles para los ensayos

De estas probetas se han fabricado varios ejemplares atendiendo un reducido grupo de mezclas seleccionadas para placas y para paneles. Sobre estas probetas se efectúan los ensayos físicos y de resistencia mecánica posteriores (Capítulo 6).

4. Ensayos de placas y paneles

Las fotografías de este punto ilustran y complementan la información sobre algunos de los ensayos a las que han sido sometidas las probetas de Placas y Paneles.

Índice general de la tesis

RESUMEN	i
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 ORIGEN DEL TRABAJO	3
1.2 CAMPOS DE ACCIÓN	5
1.2.1 MEDIOAMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD	5
1.2.1.1 Algunos antecedentes del pensamiento medioambiental	5
1.2.1.1.a La Reunión de Río de Janeiro	6
1.2.1.1.b Johannesburgo 2003. La Cumbre Mundial sobre desarrollo sostenible	7
1.2.1.1.c El concepto "Desarrollo Sostenible"	8
1.2.1.2 Productos, Residuos y Sostenibilidad	10
1.2.1.2.a Principios naturales en la ecología industrial	11
1.2.1.3 Hacia la disminución del impacto de los productos al medioambiente. El ecodiseño	13
1.2.1.3.a Definiciones de ecodiseño	14
1.2.1.3.b Evolución del ecodiseño	14
1.2.1.3.c Técnicas del ecodiseño	16
1.2.1.3.d Estrategias de ecodiseño	16
1.2.2 LOS RESIDUOS	17
1.2.2.1 Los Residuos Municipales	17
1.2.2.1.a Tipos de Residuos Municipales	19
1.2.2.1.b Factores que inciden en la generación de los Residuos Municipales o RSU	20
1.2.2.2 Gestión de Residuos Municipales	20
1.2.2.3 Propuestas de solución al problema de los Residuos Municipales	22
1.2.2.3.a Reducción de los RSU	23
1.2.2.4 Reutilización y Reciclaje	24
1.2.2.4.a Tratamiento de residuos	24
1.2.3 RECICLAJE DE LOS PLÁSTICOS	24
1.2.3.1 Algunos antecedentes	24
1.2.3.2 La terminología	25
1.2.3.3 Clasificación de tecnologías para el reciclaje de plásticos	25

1.2.3.3.a	Reciclaje primario	25
1.2.3.3.b	Reciclaje secundario	25
1.2.3.3.c	Reciclaje terciario	26
1.2.3.3.d	Reciclaje cuaternario	26
1.2.3.4	Actividades asociadas al reciclaje de plásticos	26
1.2.3.5	Tecnologías para la recuperación y el reciclaje de plásticos	27
1.2.3.5.a	Recolección o Recogida	27
1.2.3.5.b	Selección de residuos de plástico	27
1.2.3.5.c	Reciclaje mecánico	30
1.2.3.5.d	Reciclaje químico	31
1.2.3.6	Los procesos de recuperación y reciclaje de espumas de EPS	33
1.2.3.6.a	Operaciones previas al reciclaje del EPS	34
1.2.3.6.b	Triturado de EPS para la fabricación de nuevos moldeados	34
1.2.3.6.c	Triturado de EPS para mejora de suelos y producción de composta	35
1.2.3.6.d	El EPS reciclado de aplicación en la construcción	36
1.2.3.6.e	Reciclaje de EPS en granza	37
1.2.3.6.f	Reciclaje de EPS por solventes	39
1.2.3.6.g	Recuperación energética de los residuos de EPS	39
1.2.3.6.h	El vertido de residuos de EPS	40
1.2.4	DATOS DE PRODUCCIÓN, CONSUMO Y RECICLAJE DE LOS PLÁSTICOS	41
1.2.4.1	Los plásticos en el mundo	41
1.2.4.1.a	Producción mundial de plásticos	41
1.2.4.1.b	Consumo mundial de plásticos	42
1.2.4.2	Consumo de plásticos en Europa Occidental	44
1.2.4.2.a	Gestión de residuos de plástico en Europa Occidental	46
1.2.5	DATOS DE PRODUCCIÓN Y RECICLAJE DE EPS	49
1.2.5.1	La industria productora de EPS	49
1.2.5.2	Recuperación y reciclaje de EPS en Europa Occidental	53
1.2.5.2.a	Recuperación y Reciclaje de EPS en España	54
2	ESTRUCTURA DE LA TESIS	59
2.1	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	59
2.2	HIPÓTESIS	59
2.2.1	HIPÓTESIS DE POSIBILIDAD	59

2.2.2	HIPÓTESIS DE EFECTIVIDAD	60
2.2.3	HIPÓTESIS DE BENEFICIO	60
2.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	60
2.4	ALCANCES DE LA TESIS	60
2.5	METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES	62
2.5.1	INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	62
2.5.1.1	Elementos generales	63
2.5.1.2	Elementos específicos	64
2.5.2	PROPUESTAS DE SOLUCIONES	64
2.5.3	TRABAJO EXPERIMENTAL	65
2.5.3.1	Experimentación preliminar	65
2.5.3.2	Experimentación general	65
2.5.3.3	Experimentación específica	65
2.5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
2.5.5	PROPUESTAS DE APLICACIÓN DE MATERIALES CON RESIDUOS DE EPS CONGLOMERADOS CON YESO O ESCAYOLA	66
2.6	CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	66
3	ANTECEDENTES A LA APLICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE EPS CONGLOMERADOS CON YESO O ESCAYOLA EN LA CONSTRUCCIÓN	73
3.1	LOS PLÁSTICOS EN LA CONSTRUCCIÓN	73
3.1.1	PROPIEDADES DE INTERÉS DE LOS PLÁSTICOS EN LA CONSTRUCCIÓN	73
3.1.2	UTILIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS EN LA CONSTRUCCIÓN	74
3.1.2.1	Espumas rígidas de plástico como elemento de construcción y aislantes	75
3.1.2.1.a	Espumas estructurales	76
3.1.2.1.b	Espumas de núcleo o intermedias	76
3.1.2.1.c	Espumas ligeras	77
3.1.2.1.d	Espuma rígida de PUR	78
3.1.2.1.e	Espuma rígida de Urea Formaldehído (UF)	80
3.1.2.1.f	Espuma rígida de poliisocianurato (PIR)	80
3.1.2.1.g	Espuma rígida de carbonamida (PCD)	80
3.1.2.1.h	Espuma de resina fenólica	81
3.2	EL EPS EN LA CONSTRUCCIÓN	81
3.2.1	APLICACIONES GENERALES DEL EPS	81

3.2.2	USO DEL EPS COMO AISLANTE TÉRMICO-ACÚSTICO EN LA CONSTRUCCIÓN	82
3.2.2.1	Aislamiento térmico-acústico con planchas de EPS en muros	83
3.2.2.1.a	Aislamiento exterior con planchas de EPS	83
3.2.2.1.b	Aislamiento interior con planchas de EPS	84
3.2.2.1.c	Aislamiento intermedio con planchas de EPS	84
3.2.2.2	Aislamiento térmico con EPS en techos	84
3.2.2.2.a	Aislamiento de cubiertas	84
3.2.2.2.b	Paneles de EPS en el revestimiento de techos	85
3.2.2.2.c	EPS en techos como revestimiento directo y molduras	85
3.2.2.3	EPS en aislamiento de suelos	86
3.2.2.4	EPS en la fabricación de elementos constructivos y formación de estructuras en obra	86
3.2.2.4.a	Ladrillos celulares	86
3.2.2.4.b	Encofrados perdidos	87
3.2.2.4.c	Piezas moldeadas para la obtención de forjados aligerados	87
3.2.2.4.d	Bloques ligeros para encofrados perdidos	88
3.2.2.4.e	Moldes para prefabricados de hormigón que no son recuperables	88
3.2.2.4.f	Moldeado de paneles decorativos	88
3.2.2.4.g	Hormigón aligerado con perlas preexpandidas de poliestireno	88
3.2.2.4.h	Hormigón aligerado con perlas de EPS	89
3.2.2.5	Aplicaciones del EPS en obras de ingeniería civil	89
3.3	ELEMENTOS DE YESO Y ESCAYOLA PARA LA CONSTRUCCIÓN	90
3.3.1	PANELES DE YESO PARA TABIQUES	90
3.3.1.1	Características generales de los paneles de yeso para tabiques	91
3.3.2	PLACAS DE YESO O ESCAYOLA Y COMPLEMENTOS PARA TECHOS	92
3.3.2.1	Placas para techos continuos fabricadas con escayola	92
3.3.2.1.a	Características de las placas de techos continuos	93
3.3.2.2	Placas para techos desmontables fabricadas con Escayola	94
3.3.2.2.a	Características de las placas para techos desmontables	94
3.3.2.3	Complementos para techos de yeso o escayola	94
3.3.3	PLACAS DE YESO LAMINADO	95
3.3.3.1	Características de los materiales de placas de yeso laminado	95
3.3.3.1.a	Núcleo de las placas de yeso	95
3.3.3.1.b	Envoltentes de cartón de placas de yeso	95

3.3.3.1.c	Tipos de bordes de placas de yeso	96
3.3.3.1.d	Dimensiones de las placas	96
3.3.3.2	Propiedades generales de las placas	96
3.3.3.2.a	Resistencia mecánica a la flexión	96
3.3.3.2.b	Resistencia al impacto	96
3.3.3.2.c	Otras propiedades de las placas de yeso	97
3.3.3.3	Tipos de placas de yeso laminado más comunes en el mercado	97
3.3.3.3.a	Placa estándar STD	97
3.3.3.3.b	Placa F	97
3.3.3.3.c	Placa AD	97
3.3.3.3.d	Placa HR	97
3.3.3.3.e	Placa H	98
3.3.3.3.f	Placa M0	98
3.3.3.4	Transformados con placas de yeso laminado	98
3.3.3.4.a	Transformado de barrera de vapor (BV)	98
3.3.3.4.b	Transformado para aislamiento térmico (XPE)	98
3.3.3.4.c	Transformado para aislamiento térmico (XPS)	98
3.3.3.4.d	Transformado con lana de roca (LR)	99
3.3.3.4.e	Transformado con lana de vidrio	99
3.3.3.4.f	Transformado para techos y paramentos predecorados	99
3.3.3.4.g	Transformados de placa perforada	99
3.3.3.4.h	Transformados de protección (RX)	99
3.3.3.4.i	Transformado de trillaje	99
3.3.3.5	Sistema de producción de la placa de yeso laminado	99
3.4	ESTADO DE LA TÉCNICA	101
3.4.1	TRABAJOS DESARROLLADOS POR OTROS INVESTIGADORES	101
3.4.1.1	Fabricación de paneles con papel reciclado y partículas de madera de pino aglomeradas con yeso	101
3.4.1.2	Desarrollo de materiales compuestos yeso-corcho para aplicaciones en la construcción	103
3.4.1.3	Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para la construcción	104
3.4.1.4	Gránulos de poliestireno en materiales compuestos de cemento	105
3.4.1.5	Nuevos materiales compuestos de baja conductividad térmica para la construcción	107
3.4.1.6	Composiciones de yeso de bajo peso	108

4 TRABAJOS PREVIOS A LA EXPERIMENTACIÓN	111
4.1 DETERMINACIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS DE ESPUMA DE EPS A USARSE EN LA EXPERIMENTACIÓN	111
4.1.1 INTRODUCCIÓN	111
4.1.2 CORTE DE LOS RESIDUOS DE ESPUMA DE EPS	111
4.1.2.1 Descripción	111
4.1.2.2 Objetivos	112
4.1.2.3 Materiales y procedimiento	112
4.1.2.3.a Materiales	112
4.1.2.3.b Equipo	112
4.1.2.3.c Procedimiento	113
4.1.2.4 Resultados del experimento de corte de residuos de EPS	113
4.1.3 PERFIL DE LOS RESIDUOS MOLIDOS DE ESPUMA DE EPS	114
4.1.3.1 Descripción	114
4.1.3.2 Objetivos	114
4.1.3.3 Materiales y procedimiento	114
4.1.3.3.a Materiales	114
4.1.3.3.b Equipo	115
4.1.3.3.c Procedimiento	115
4.1.3.4 Resultados del experimento del perfil de residuos molidos de EPS	116
4.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE EPS	118
4.1.5 CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE EPS	118
4.2 ENSAYOS PREPARATORIOS A LA ETAPA EXPERIMENTAL	119
4.2.1 EXPERIMENTACIÓN EXPLORATORIA DE MEZCLAS	119
4.2.1.1 Descripción	119
4.2.1.2 Objetivos	119
4.2.1.3 Materiales y procedimiento	120
4.2.1.3.a Materiales	120
4.2.1.3.b Equipo	120
4.2.1.3.c Procedimiento	120
4.2.1.4 Resultados de la experimentación exploratoria de mezclas	121
4.2.1.5 Análisis de resultados de la experimentación exploratoria de mezclas	122

4.2.1.6	Conclusiones de la experimentación exploratoria de mezclas	125
5	PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL. MANEJO Y SELECCIÓN DE MEZCLAS	129
5.1	MANEJO DE MEZCLAS	129
5.1.1	PROCESO DE ELABORACIÓN DE MEZCLAS	129
5.1.1.1	Descripción	129
5.1.1.2	Objetivos de la experimentación	129
5.1.1.2.a	Otros objetivos	129
5.1.1.3	Metodología del experimento	130
5.1.1.3.a	Nomenclatura de las mezclas experimentales	130
5.1.1.3.b	Determinación de los conjuntos de trabajo	133
5.1.1.3.c	Experimentos secundarios	136
5.1.1.4	Materiales y procedimiento	137
5.1.1.4.a	Yesos y escayola	137
5.1.1.4.b	Agua de amasado	138
5.1.1.4.c	Residuos de espuma de EPS	138
5.1.1.4.d	Otros materiales	138
5.1.1.4.e	Equipo	138
5.1.1.4.f	Procedimiento	139
5.1.1.5	Resultados del proceso de elaboración de mezclas	139
5.1.1.6	Análisis de resultados del proceso de elaboración de mezclas	142
5.1.1.7	Conclusiones del proceso de la elaboración de mezclas	148
5.2	PROCESO DE SELECCIÓN DE MEZCLAS	151
5.2.1	DESCRIPCIÓN	151
5.2.2	METODOLOGÍA	151
5.2.2.1	Primera etapa de selección	152
5.2.2.1.a	Objetivo	152
5.2.2.1.b	Proceso de evaluación	153
5.2.2.1.c	Resultados de la primera etapa de selección	154
5.2.2.2	Segunda etapa de selección	155
5.2.2.2.a	Objetivo	155
5.2.2.2.b	Método	155
5.2.2.2.c	Materiales y equipo	155
5.2.2.2.d	Proceso de evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 1. <i>Placas de yeso o escayola con residuos de EPS</i>	156

5.2.2.2.e	Resultados de la evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 1	158
5.2.2.2.f	Proceso de evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 2. <i>Paneles de residuos de EPS conglomerados</i>	158
5.2.2.2.g	Resultados de la evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 2	160
5.2.3	CONCLUSIONES DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE MEZCLAS	161
	Galería de fotos del capítulo 5	163
6	SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL. ENSAYOS	169
6.1	ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LAS MEZCLAS SELECCIONADAS SEGÚN DOS PROPUESTAS DE APLICACIÓN	169
6.1.1	INTRODUCCIÓN	169
6.1.2	FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	171
6.1.2.1	Descripción	171
6.1.2.1.a	Equipo	172
6.1.2.1.b	Materiales	174
6.1.2.1.c	Procedimiento	175
6.1.3	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS	175
6.1.3.1	Interpretación de fórmulas condensadas del capítulo 6	176
6.2	ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS PARA LA PROPUESTA DE APLICACIÓN COMO PLACA DE YESO	178
6.2.1	ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA POR INMERSIÓN TOTAL DE PLACAS	178
6.2.1.1	Descripción	178
6.2.1.1.a	Norma utilizada UNE 102035/1M:2001	178
6.2.1.1.b	Equipo	178
6.2.1.1.c	Preparación de las probetas	178
6.2.1.1.d	Procedimiento	179
6.2.1.2	Resultados del ensayo de absorción de agua	180
6.2.1.3	Análisis de resultados del ensayo de absorción de agua	182
6.2.1.4	Conclusiones del ensayo de absorción de agua	183
6.2.2	ENSAYO DE LA DENSIDAD LAMINAR DE PLACAS	184
6.2.2.1	Descripción	184
6.2.2.1.a	Norma utilizada UNE 102035/1M:2001	184
6.2.2.1.b	Equipo	185
6.2.2.1.c	Preparación de las probetas	185

6.2.2.1.d	Procedimiento	186
6.2.2.2	Resultados del ensayo de la densidad laminar	186
6.2.2.3	Análisis de resultados del ensayo de la densidad laminar	188
6.2.2.4	Conclusiones del ensayo de la densidad laminar	189
6.2.3	ENSAYO DE FLEXIÓN DE PLACAS	190
6.2.3.1	Descripción	190
6.2.3.1.a	Norma utilizada UNE 102035/1M:2001	190
6.2.3.1.b	Equipo	190
6.2.3.1.c	Preparación de las probetas	192
6.2.3.1.d	Procedimiento	193
6.2.3.2	Resultados del ensayo de flexión	193
6.2.3.3	Análisis de resultados del ensayo de flexión	195
6.2.3.4	Conclusiones del ensayo de flexión	197
6.2.4	ENSAYO DE REACCIÓN AL FUEGO DE PLACAS	197
6.2.4.1	Descripción	199
6.2.4.1.a	Norma utilizada UNE-EN-ISO 11925-2:2002	199
6.2.4.1.b	Equipo	199
6.2.4.1.c	Preparación de las probetas	200
6.2.4.1.d	Procedimiento	201
6.2.4.2	Resultados del ensayo de reacción al fuego	201
6.2.4.3	Análisis de resultados del ensayo de reacción al fuego	204
6.2.4.4	Conclusiones del ensayo de reacción al fuego	206
6.2.5	ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DE PLACAS	208
6.2.5.1	Descripción	208
6.2.5.1.a	Norma utilizada UNE 102035/1M:2001	208
6.2.5.1.b	Equipo	208
6.2.5.1.c	Preparación de las probetas	208
6.2.5.1.d	Procedimiento	209
6.2.5.2	Resultados del ensayo de resistencia al impacto	210
6.2.5.3	Análisis de resultados del ensayo de resistencia al impacto	211
6.2.5.4	Conclusiones del ensayo de resistencia al impacto	214
6.3	ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS PARA LA PROPUESTA DE APLICACIÓN COMO PANEL AISLANTE TÉRMICO	214
6.3.1	ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA POR INMERSIÓN TOTAL DE PANELES	214
6.3.1.1	Descripción	214
6.3.1.1.a	Norma utilizada	215

6.3.1.1.b	Equipo	215
6.3.1.1.c	Preparación de las probetas	215
6.3.1.1.d	Procedimiento	216
6.3.1.2	Resultados del ensayo de absorción de agua	217
6.3.1.3	Análisis de resultados de absorción de agua	219
6.3.1.4	Conclusiones del ensayo de absorción de agua	220
6.3.2	ENSAYO DE LA COMPRESIÓN DE PANELES	221
6.3.2.1	Descripción	221
6.3.2.1.a	Norma utilizada UNE 53205:2001	221
6.3.2.1.b	Equipo	221
6.3.2.1.c	Preparación de las probetas	222
6.3.2.1.d	Procedimiento	223
6.3.2.2	Resultados del ensayo de la compresión	223
6.3.2.3	Análisis de resultados del ensayo de la compresión	224
6.3.2.4	Conclusiones del ensayo de la compresión	226
6.3.3	ENSAYO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PANELES	227
6.3.3.1	Descripción	227
6.3.3.1.a	Norma utilizada UNE-EN 13163:2002	227
6.3.3.1.b	Equipo	228
6.3.3.1.c	Preparación de las probetas	228
6.3.3.1.d	Procedimiento	228
6.3.3.2	Resultados del ensayo de la conductividad térmica	229
6.3.3.3	Comparativa del coeficiente de conductividad térmica con otros materiales	230
6.3.3.4	Conclusiones del ensayo de conductividad térmica	232
6.3.4	ENSAYO DE LA DENSIDAD APARENTE DE PANELES	232
6.3.4.1	Descripción	232
6.3.4.1.a	Norma utilizada UNE-EN 1602:1997	232
6.3.4.1.b	Equipo	233
6.3.4.1.c	Preparación de las probetas	233
6.3.4.1.d	Procedimiento	233
6.3.4.2	Resultados del ensayo de la densidad aparente	234
6.3.4.3	Análisis de resultados del ensayo de la densidad aparente	236
6.3.4.4	Conclusiones del ensayo de la densidad aparente	237
6.3.5	ENSAYO DE FLEXIÓN DE PANELES	237
6.3.5.1	Descripción	237
6.3.5.1.a	Norma utilizada UNE 53204-2:2001	238

6.3.5.1.b	Equipo	238
6.3.5.1.c	Preparación de las probetas	238
6.3.5.1.d	Procedimiento	239
6.3.5.2	Resultados del ensayo de flexión	240
6.3.5.3	Análisis de resultados del ensayo de flexión	241
6.3.5.4	Conclusiones del ensayo de flexión	242
6.3.6	ENSAYO DE REACCIÓN AL FUEGO DE PANELES	243
6.3.6.1	Descripción	243
6.3.6.1.a	Norma utilizada UNE 53127:2002	244
6.3.6.1.b	Equipo	244
6.3.6.1.c	Preparación de probetas	245
6.3.6.1.d	Procedimiento	245
6.3.6.2	Resultados del ensayo de reacción al fuego	246
6.3.6.3	Análisis de resultados del ensayo de reacción al fuego	247
6.3.6.4	Conclusiones del ensayo de reacción al fuego	248
6.4	CONCLUSIONES GENERALES DEL CAPÍTULO 6	250
6.4.1	CONCLUSIONES DE LAS PLACAS DE YESO O ESCAYOLA CON RESIDUOS DE EPS	250
6.4.1.1	Conclusiones del ensayo de absorción de agua por inmersión de placas	251
6.4.1.2	Conclusiones del ensayo de densidad laminar de placas	253
6.4.1.3	Conclusiones del ensayo de flexión de placas	253
6.4.1.4	Conclusiones del ensayo de reacción al fuego de placas	254
6.4.1.5	Conclusiones del ensayo de resistencia al impacto de placas	254
6.4.1.6	Conclusiones del conjunto de ensayos realizados a las placas	255
6.4.2	CONCLUSIONES DE LOS PANELES CON RESIDUOS DE EPS CONGLOMERADOS CON ESCAYOLA	256
6.4.2.1	Conclusiones del ensayo de absorción de agua de paneles	257
6.4.2.2	Conclusiones del ensayo de compresión de paneles	257
6.4.2.3	Conclusiones del ensayo de conductividad térmica de paneles	258
6.4.2.4	Conclusiones del ensayo de densidad aparente de paneles	258
6.4.2.5	Conclusiones del ensayo de flexión de paneles	258
6.4.2.6	Conclusiones del ensayo de reacción al fuego de paneles	259
6.4.2.7	Conclusiones del conjunto de ensayos aplicados en paneles	259
	Normas usadas en el capítulo 6	263
	Galería de fotos del capítulo 6	267

7	CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS	273
7.1	CONCLUSIONES PRINCIPALES	273
7.2	CONCLUSIONES SOBRE COMPORTAMIENTOS INVESTIGADOS	274
7.3	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	274
7.4	CONCLUSIONES DE LAS PROPIEDADES DE PLACAS Y PANELES	277
7.5	CONCLUSIONES SOBRE LA FABRICACIÓN DE PLACAS Y PANELES	281
7.6	CONCLUSIONES SOBRE LAS VENTAJAS DE LOS PANELES Y PLACAS DE YESO CON RESIDUOS DE EPS	283
7.7	CONCLUSIONES SOBRE LAS DESVENTAJAS DE PANELES Y PLACAS DE YESO CON RESIDUOS DE EPS	285
7.8	CONCLUSIONES ACERCA DEL USO DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE EPS CON YESO O ESCAYOLA COMO PASTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN	287
7.9	CONCLUSIONES FINALES	287
	ANEXOS	301
A1	EL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	303
A1.1	ORIGEN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	303
A1.2	PROCESOS DE OBTENCIÓN DEL PS	304
A1.3	EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	305
A1.4	PROPIEDADES DEL EPS	307
A1.4.1	Propiedades físicas	307
A1.4.1.1	Densidad	307
A1.4.1.2	Resistencia mecánica	308
A1.4.1.3	Tensión de compresión	308
A1.4.1.4	Propiedades de aislamiento térmico	309
A1.4.1.5	Propiedades de aislamiento acústico	310
A1.4.1.6	Comportamiento ante el agua	310
A1.4.1.7	Estabilidad dimensional	310
A1.4.1.8	Estabilidad frente a la temperatura	311
A1.4.1.9	Efectos del medioambiente sobre el EPS	311
A1.4.2	Resistencia Química	312
A1.4.3	Propiedades biológicas	312

A1.4.4	Comportamiento al fuego	313
A2	PERFIL TÉCNICO DEL YESO	317
A2.1	GENERALIDADES	317
A2.1.1	Descripción	317
A2.1.2	Naturaleza del yeso	317
A2.1.3	El sistema sulfato cálcico-agua	317
A2.1.3.1	El sistema sulfato cálcico-agua	318
A2.1.3.2	El sulfato cálcico semihidratado	318
A2.1.3.3	Anhidrita III	318
A2.1.3.4	Anhidrita II	319
A2.1.3.5	Anhidrita I	319
A2.2	PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DEL YESO	319
A2.2.1	Descripción	320
A2.2.2	Yeso de construcción	320
A2.2.3	Escayolas	320
A2.2.4	Yesos prefabricados	320
A2.2.5	Yeso para la fabricación de placas de yeso laminado	320
A2.2.6	Yeso alfa	321
A2.3	CLASIFICACIÓN DE LOS YESOS COMERCIALES	321
A2.3.1	Tipos de yeso y escayolas normalizados en España	321
A2.3.1.1	Yeso grueso de construcción YG	321
A2.3.1.2	Yeso fino de construcción YF	321
A2.3.1.3	Yeso prefabricado YP	322
A2.3.1.4	Escayola E-30 ó E-35	322
A2.4	PROPIEDADES DE LOS YESOS EN POLVO	323
A2.4.1	Finura del molido	323
A2.4.2	Composición química	323
A2.4.3	Índice de pureza de los yesos en polvo	323
A2.4.4	Aditivos para yesos y escayolas	324
A2.4.4.1	Aditivos para yesos y escayolas	324
A2.4.4.2	Aceleradores del fraguado	325
A2.4.4.3	Espesantes y retenedores de agua	325
A2.4.4.4	Fluidificantes	325
A2.4.4.5	Impermeabilizantes	325
A2.4.5	Agregados	326
A2.4.5.1	Perlita expandida	326

A2.4.5.2	Vermiculita exfoliada	326
A2.5	CARACTERÍSTICAS DE LAS PASTAS DE YESO O ESCAYOLA Y AGUA	327
A2.5.1	Agua de amasado	327
A2.5.2	Fraguado de yesos y escayolas	327
A2.5.2.1	Expansión de las pastas de yeso y escayola	329
A2.6	CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS ENDURECIDOS DE YESO Y ESCAYOLA	330
A2.6.1	Porosidad y densidad	330
A2.6.2	Contenido en humedad en los productos de yeso y escayola	332
A2.6.3	Resistencia mecánica de productos fraguados de yeso y escayola	332
A2.7	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE YESOS Y ESCAYOLAS	333
A2.7.1	El aislamiento térmico	333
A2.7.1.1	Coefficiente de conductividad térmica	334
A2.7.1.2	Normativas	335
A2.7.1.3	Valores para productos de yeso	335
A2.7.1.4	Calor específico	336
A2.7.1.5	Influencia del yeso en el aislamiento de las capas límites de contacto sólido-aire	336
A2.7.2	Difusión y condensación de vapor de agua	337
A2.7.2.1	Permeabilidad o difusibilidad al vapor de agua (<i>dv</i>)	337
A2.7.2.2	Condensación	337
A2.7.2.3	Transpiración de los yesos y escayolas	337
A2.7.2.4	Regulación de la humedad	338
A2.7.3	Protección contra el fuego	338
A2.7.3.1	Normativa de construcción para la prevención de incendios	339
A2.7.3.2	Comportamiento del yeso ante el fuego	339
A2.7.4	Producción de yesos aligerados	340
A2.8	PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL YESO	340
A2.9	PRODUCCIÓN DE YESO EN EUROPA	341
A2.10	PRODUCCIÓN DE YESO EN ESPAÑA	342
A3	AVANCES PARA OTRAS APLICACIONES. PASTAS	345
A3.1	ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS PARA LAS MEZCLAS CON YESO O ESCAYOLA CON RESIDUOS DE EPS PARA OTRAS APLICACIONES	345
A3.1.1	INTRODUCCIÓN	345

A3.1.2	OBJETIVO	346
A3.1.3	FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	346
A3.1.3.1	Descripción	346
	A3.1.3.1.a Equipo	347
	A3.1.3.1.b Materiales	347
A3.1.4	METODOLOGÍA	347
A3.1.5	ENSAYO DE COMPRESIÓN	348
A3.1.5.1	Descripción	348
	A3.1.5.1.a Norma utilizada UNE 102031:1999	348
	A3.1.5.1.b Equipo	348
	A3.1.5.1.c Preparación de las probetas	349
	A3.1.5.1.d Procedimiento	349
A3.1.5.2	Resultados del ensayo de compresión	350
A3.1.5.3	Análisis de resultados del ensayo de compresión	351
A3.1.5.4	Conclusiones del ensayo de compresión	353
A3.1.6	ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE	354
A3.1.6.1	Descripción	354
	A3.1.6.1.a Norma utilizada	354
	A3.1.6.1.b Equipo	354
	A3.1.6.1.c Preparación de las probetas	354
	A3.1.6.1.d Procedimiento	355
A3.1.6.2	Resultados del ensayo de densidad aparente	355
A3.1.6.3	Análisis de resultados del ensayo de densidad aparente	358
A3.1.6.4	Conclusiones del ensayo de densidad aparente	360
A3.1.7	ENSAYO DE FLEXIÓN	361
A3.1.7.1	Descripción	361
	A3.1.7.1.a Norma utilizada UNE 102031	361
	A3.1.7.1.b Equipo	361
	A3.1.7.1.c Preparación de las probetas	362
	A3.1.7.1.d Procedimiento	362
A3.1.7.2	Resultados del ensayo de flexión	363
A3.1.7.3	Análisis de resultados del ensayo de flexión	364
A3.1.7.4	Conclusiones del ensayo de flexión	365
A3.2	CONCLUSIONES GENERALES DEL ANEXO A3	366

Índice de tablas

ÍNDICE DE TABLAS DEL CAPÍTULO 1

Tabla 1.1	Estrategias generales de diseño según Keoleian	17
Tabla 1.2	Total de plástico recuperado en Europa Occidental 1998 - 2003, en cantidad (x 1000 toneladas) y porcentaje	47

ÍNDICE DE TABLAS DEL CAPÍTULO 2

Tabla 2.1	Correspondencia entre la estructura de la tesis y las etapas típicas de un modelo experimental	67
-----------	--	----

ÍNDICE DE TABLAS DEL CAPÍTULO 3

Tabla 3.1	Distribución de los plásticos en la construcción por tipo	74
Tabla 3.2	Distribución de los plásticos en la construcción por tipo	75
Tabla 3.3	Equivalencias en capacidad de aislamiento entre el PUR y otros materiales tradicionales en la construcción	79
Tabla 3.4	Equivalencias en conductividad térmica del EPS con respecto a materiales tradicionales de construcción	83
Tabla 3.5	Dimensiones preferentes para placas de techo continuo de escayola	93
Tabla 3.6	Dimensiones preferentes y tolerancias por tipo de placas para techos desmontables	94
Tabla 3.7	Carga de rotura a la flexión mínima de placas de yeso laminado según la Norma UNE 102035	96
Tabla 3.8	Características de las placas de yeso laminado estándar comercial	100
Tabla 3.9	Reporte de resultados de los materiales elaborados por Haselein	102
Tabla 3.10	Composición por tamaños de los gránulos EPS experimentados	106

ÍNDICE DE TABLAS DEL CAPÍTULO 4

Tabla 4.1	Características de los residuos de EPS cortados manualmente	113
Tabla 4.2	Número y características de cada grupo de residuos molidos	116
Tabla 4.3	Características y zona de procedencia de los residuos, molido grueso (MG)	116
Tabla 4.4	Características y zona de procedencia de los residuos, molido fino (MF)	117
Tabla 4.5	Residuos molidos composición total de la muestra (MG y MF) por tamaños o características y zona de procedencia	117
Tabla 4.6	Fórmulas de las probetas usando Escayola como conglomerante	121
Tabla 4.7	Fórmulas de las probetas usando Yeso rápido como conglomerante	121
Tabla 4.8	Fórmulas individuales y masas obtenidas de las probetas usando Escayola como conglomerante	122

Tabla 4.9	Fórmulas individuales y masas obtenidas de las probetas usando Yeso rápido como conglomerante	122
-----------	---	-----

ÍNDICE DE TABLAS DEL CAPÍTULO 5

Tabla 5.1	Ejemplo de uso de la nomenclatura para una mezcla con un solo elemento	131
Tabla 5.2	Ejemplo de uso de la nomenclatura para una mezcla con varios elementos	132
Tabla 5.3	Abreviaturas de los componentes aplicados en las fórmulas de las mezclas	132
Tabla 5.4	Probetas elaboradas únicamente con conglomerante y agua al 60% y 80% en peso	133
Tabla 5.5	Probetas elaboradas con conglomerante-agua, residuos en bajo porcentaje hasta 0,4%	134
Tabla 5.6	Probetas elaboradas en dos etapas (multicapas), agua 60 y 80%, residuos hasta 0,98%	134
Tabla 5.7	Probetas elaboradas con dos y tres capas, agua 80, 90 y 100%, residuos hasta 1,08%	134
Tabla 5.8	Probetas elaboradas con agua hasta un 300% y aumento en la cantidad de MG hasta 14,4%	135
Tabla 5.9	Probetas de relación yeso-agua hasta 600% en peso y residuos hasta 35,1% en peso	135
Tabla 5.10	Probetas (57 y 58) elaboradas para preforma que se aplicarán en las probetas 59 y 60	135
Tabla 5.11	Probetas elaboradas en una capa con papel y almidón, agua hasta 500% en peso y EPS molido fino y grueso hasta 27% en peso	136
Tabla 5.12	Masas y densidades de las probetas. Conjunto de trabajo 1 al 8	140
Tabla 5.13	Conductas de las mezclas experimentadas durante su amasado	144
Tabla 5.14	Criterios de calificación de la unión entre el núcleo y el envolvente	147
Tabla 5.15	Calificaciones de los ensayos de aplicación de un adhesivo y papel	147
Tabla 5.16	Valores para la primera etapa de selección	153
Tabla 5.17	Número de probeta y su evaluación en puntos según cada criterio, comparada con la placa de yeso estándar	154
Tabla 5.18	Número de probeta y su evaluación en puntos según cada criterio, comparada con un panel de espuma de EPS	154
Tabla 5.19	Mezclas seleccionadas para cada aplicación propuesta de placa y de panel	155
Tabla 5.20	Criterios de evaluación y factores numéricos aplicados de placa. Grupo 1	158
Tabla 5.21	Aportación en puntos para cada criterio por mezcla evaluada de placa. Grupo 1	158
Tabla 5.22	Criterios de evaluación y factores numéricos aplicados de panel. Grupo 2	160
Tabla 5.23	Aportación en puntos para cada criterio por mezcla evaluada de panel. Grupo 2	160
Tabla 5.24	Mezclas seleccionadas para ensayarse en laboratorio	161

ÍNDICE DE TABLAS DEL CAPÍTULO 6

Tabla 6.1.1	Aplicación similar a placa. Dimensiones de las probetas ensayadas	171
-------------	---	-----

Tabla 6.1.2	Aplicación similar a panel. Dimensiones de las probetas ensayadas	171
Tabla 6.1.3	Ejemplo de uso de la nomenclatura usada en el capítulo 6	176
Tabla 6.1.4	Ejemplo de la nomenclatura usada para las probetas de referencia (R)	177
Tabla 6.1.5	Ejemplo de aplicación de nomenclatura para cada una de las probetas pertenecientes a una misma serie	177
Tabla 6.1.6	Abreviaturas de componentes y residuos de EPS usados en el capítulo 6	177
Tabla 6.2.1	Características de las probetas a ensayar a absorción de agua por inmersión total	179
Tabla 6.2.2	Promedios de los pesos obtenidos por probeta en cada período	180
Tabla 6.2.3	Aumento de peso promedio por cada serie en relación al peso inicial o peso seco	181
Tabla 6.2.4	Características de las probetas del ensayo de la densidad laminar	185
Tabla 6.2.5	Medición de las masas de las probetas y sus promedios	186
Tabla 6.2.6	Medición de largos y anchos de las probetas y sus promedios	187
Tabla 6.2.7	Masa por unidad de superficie promedio por tipo de mezcla	188
Tabla 6.2.8	Relación de la masa promedio entre probetas, por tipo de conglomerante usado y la cantidad de residuos de EPS	188
Tabla 6.2.9	Relación en por ciento entre las masas por unidad de superficie reportadas en el experimento contra las placas comerciales	189
Tabla 6.2.10	Características de las probetas a ensayar a flexión	192
Tabla 6.2.11	Carga máxima de rotura a la flexión por probeta	194
Tabla 6.2.12	Carga máxima de rotura a la flexión promedio por tipo de mezcla	194
Tabla 6.2.13	Características de las probetas del ensayo de reacción al fuego	200
Tabla 6.2.14	Resultados individuales por probeta ensayadas por un borde transversal. Placas comerciales	202
Tabla 6.2.15	Resultados individuales por probeta ensayadas por un borde transversal. Mezclas de yeso o escayola sin residuos de espuma de EPS	202
Tabla 6.2.16	Resultados individuales por probeta ensayadas por un borde transversal. Mezclas con residuos de espuma de EPS y con recubrimientos	203
Tabla 6.2.17	Resultados individuales por probeta ensayadas por un borde transversal. Mezclas con residuos de espuma de EPS sin recubrimientos	203
Tabla 6.2.18	Resultados individuales de probetas con recubrimiento de cartón ensayadas por el dorso. Mezclas con residuos de espuma de EPS	203
Tabla 6.2.19	Resultados individuales de probetas sin recubrimiento de cartón ensayadas por el dorso. Mezclas con residuos de espuma de EPS	204
Tabla 6.2.20	Propuesta de clasificación en el sistema de Euroclases de los materiales ensayados	207
Tabla 6.2.21	Características de las probetas a ensayar al impacto	209
Tabla 6.2.22	Diámetros individuales de huella de impacto y profundidades de huellas (mm)	210
Tabla 6.2.23	Diámetros promedio de las huellas de impacto por mezcla	211
Tabla 6.3.1	Características de las probetas a ensayar a la absorción total de agua	216
Tabla 6.3.2	Dimensiones y masas promedio individuales de las probetas antes de la inmersión	217

Tabla 6.3.3	Dimensiones y masas promedio de las probetas después del ensayo de absorción de agua por inmersión total a 96 horas	218
Tabla 6.3.4	Incremento en volumen en agua de probetas ensayadas después del período de inmersión	218
Tabla 6.3.5	Absorción promedio por mezcla en volumen de agua (%)	219
Tabla 6.3.6	Características de las probetas ensayadas a compresión	222
Tabla 6.3.7	Esfuerzo de compresión al 10% de deformación relativa por probeta	224
Tabla 6.3.8	Esfuerzo de compresión promedio al 10% de deformación relativa por tipo de material en kPa	224
Tabla 6.3.9	Características de las probetas a ensayar a la conductividad térmica	228
Tabla 6.3.10	Resultados individuales del ensayo de conductividad térmica	229
Tabla 6.3.11	Coefficientes de Conductividad térmica y densidades de algunos materiales de construcción y de algunos materiales experimentales de interés	230
Tabla 6.3.12	Espesores equivalentes necesarios para obtener la misma conductividad térmica en diferentes materiales para la construcción con relación a la mezcla 65	231
Tabla 6.3.13	Características de las probetas sometidas al ensayo de densidad aparente	233
Tabla 6.3.14	Medición de las masas de cada probeta y su promedio	234
Tabla 6.3.15	Medición de largo y ancho de las probetas y su promedio	235
Tabla 6.3.16	Medición de los espesores de cada probeta y su promedio	235
Tabla 6.3.17	Densidades promedio por tipo de mezcla	235
Tabla 6.3.18	Características de las probetas con forma de prisma rectangular a ensayar a flexión	239
Tabla 6.3.19	Fuerza última y desplazamiento a la flexión por probeta ensayada	240
Tabla 6.3.20	Fuerza última y desplazamiento promedios por serie ensayada	241
Tabla 6.3.21	Características de las probetas del ensayo de reacción al fuego	245
Tabla 6.3.22	Resultados individuales por probeta de espuma virgen	246
Tabla 6.3.23	Resultados individuales por probeta con residuos de EPS	247
Tabla 6.3.24	Área dañada promedio en cm ² por serie ensayada	248
Tabla 6.3.25	Propuesta de clasificación de los materiales ensayados	250
Tabla 6.4.1	Resultados generales de los ensayos para el uso de materiales en una aplicación similar a una placa para la construcción	252
Tabla 6.4.2	Materiales seleccionados con las mejores características para la aplicación como placa	256
Tabla 6.4.3	Resultados generales de los ensayos para el uso de materiales en una aplicación similar a un panel aislante térmico de EPS para la construcción	257
Tabla 6.4.4	Mezclas con las mejores características para la aplicación de panel de aislamiento térmico similar a la espuma de EPS	261

ÍNDICE DE TABLAS DEL CAPÍTULO 7

Tabla 7.1	Comparación de resultados entre la placa comercial y la placa seleccionada (49)	275
Tabla 7.2	Comparación de resultados entre el panel de EPS virgen y el panel seleccionado (65)	275

Tabla 7.3	Comparación de la absorción de agua después de la inmersión de placa	278
Tabla 7.4	Comparación de densidad aparente y resistencia a la flexión de placas ensayadas	279
Tabla 7.5	Comparación de densidad, resistencia a la compresión y a la flexión de paneles	279
Tabla 7.6	Comparación del panel con otros materiales aislantes comunes en la construcción	280
Tabla 7.7	Propuesta de clasificación en Euroclases de paneles ensayados	280
Tabla 7.8	Propuesta de clasificación en Euroclases de las placas de yeso ensayadas	281
Tabla 7.9	Comparación de densidades de placas con residuos de EPS con placas estándar	284
Tabla 7.10	Comparación del panel de residuos de EPS con otros materiales constructivos para muros	285
Tabla 7.11	Comparación de algunas propiedades de resistencia mecánica entre placas ensayadas de yeso o escayola con o sin residuos	286
Tabla 7.12	Comparación de algunas propiedades de resistencia mecánica entre un panel de EPS estándar con paneles de escayola y residuos	286
Tabla 7.13	Resumen de resultados de los ensayos aplicados a la placa seleccionada mezcla 49 y al panel seleccionado mezcla 65	287

ÍNDICE DE TABLAS DEL ANEXO A1

Tabla A1.1	Tamaño de las perlas de EPS típicas y sus aplicaciones	305
Tabla A1.2	Densidades aparentes de EPS comerciales	308
Tabla A1.3	Clasificación de productos de EPS	309
Tabla A1.4	Cuadro resumido de las propiedades físicas del EPS usual en el mercado	311
Tabla A1.5	Cuadro resumido de las propiedades químicas del EPS usual en el mercado	312
Tabla A1.6	Resumen del comportamiento del EPS a la combustión	313

ÍNDICE DE TABLAS DEL ANEXO A2

Tabla A2.1	Características límites de yesos y escayolas en España	322
Tabla A2.2	Agua de amasado para diferentes productos	327
Tabla A2.3	Valores de expansión de hidratación	329
Tabla A2.4	Porosidad teórica de la hidratación	331
Tabla A2.5	Influencia del agua de amasado en la densidad del rehidrato para un yeso de construcción	331
Tabla A2.6	Valores mecánicos mínimos para diversos productos de yeso. Según UNE 102031	333
Tabla A2.7	Valores de conductividad térmica de materiales de construcción según NBE-CT-79	335
Tabla A2.8	Coefficiente de conductividad térmica de cálculo según NBE-CT-79	336
Tabla A2.9	Resistencia al fuego de muros de hormigón sin revestir y ladrillo cerámico	339
Tabla A2.10	Producción mundial de yeso (2000)	341
Tabla A2.11	Distribución estimada de la producción española de yeso (2001)	342

INDICE DE TABLAS DEL ANEXO A3

Tabla A3.1	Dimensiones de las probetas ensayadas en el apartado A3	347
Tabla A3.2	Características de las probetas a ensayar a la compresión	349
Tabla A3.3	Resultados por probeta del ensayo a la compresión	350
Tabla A3.4	Resultados de resistencia a la compresión en N/mm ² promedio por tipo de mezcla	351
Tabla A3.5	Comparativo de valores obtenidos para el ensayo de resistencia a la compresión de yeso o escayola-agua	351
Tabla A3.6	Características de las probetas del ensayo de densidad aparente	354
Tabla A3.7	Resultados individuales de la medición de la masa y sus promedios por probeta	356
Tabla A3.8	Medición de los espesores de los lados de cada probeta y sus promedios	356
Tabla A3.9	Medición de largos y anchos de las probetas	357
Tabla A3.10	Masa, volumen y densidad promedios de cada probeta	357
Tabla A3.11	Resultados de la densidad aparente promedio de cada serie ensayada	358
Tabla A3.12	Comparación de las densidades aparentes de yeso de construcción y escayola según diversos autores	358
Tabla A3.13	Densidades aparentes por tipo de conglomerante y composición	359
Tabla A3.14	Beneficios en las densidades aparentes de los productos con relación al porcentaje de espuma de EPS presente en la mezcla	360
Tabla A3.15	Características de las probetas ensayadas a flexión	362
Tabla A3.16	Módulos de rotura de cada probeta ensayada a flexión	363
Tabla A3.17	Promedios de los módulos de rotura por mezcla	364
Tabla A3.18	Comparación entre valores conseguidos en el ensayo y los marcados por la norma UNE 102031	365
Tabla A3.19	Resultados generales de los ensayos para el uso de pastas aligeradas de yeso o escayola para la construcción	367
Tabla A3.20	Mezcla con las mejores características para la aplicación como pastas aligeradas de yeso o escayola para la construcción	368

Índice de gráficas

ÍNDICE DE GRÁFICAS DEL CAPÍTULO 1

Gráfica 1.1	Producción Mundial de Plásticos distribuido por países productores, 2001	41
Gráfica 1.2	Producción Mundial de Plásticos por tipo de plástico, 2001	42
Gráfica 1.3	Consumo de Materiales Plásticos por regiones consumidoras en el mundo, 2000	42
Gráfica 1.4	Consumo de Materiales Plásticos. Pronóstico de crecimiento para el año 2010 por regiones consumidoras, sin aplicaciones no plásticas	43
Gráfica 1.5	Consumo per capita de materiales plásticos en kg, para todas las áreas geográficas del mundo. Período 1980 - 2010	44
Gráfica 1.6	Consumo de plástico virgen per capita y consumo global en Europa Occidental, 1998 - 2003	45
Gráfica 1.7	Datos de consumo de plástico por país en Europa Occidental, 2003	45
Gráfica 1.8	Consumo de plásticos por aplicaciones en Europa Occidental, 2003	46
Gráfica 1.9	Total de residuos de plástico de post-consumo colectables por sector en Europa Occidental en el año 2002	47
Gráfica 1.10	Recuperación en porcentaje de plástico por sectores contra el total colectado dentro del mismo sector 2002	48
Gráfica 1.11	Procedencia de los plásticos reciclados en Europa Occidental por sectores en el año 2002. No incluye recuperación energética	48
Gráfica 1.12	Crecimiento de la producción de EPS en España, 1994 - 2003	50
Gráfica 1.13	Aplicaciones generales de las espumas de EPS en España	50
Gráfica 1.14	Tendencia de traspaso de uso del EPS de unas aplicaciones a otras	51
Gráfica 1.15	Distribución por tipología de productos de EPS en la construcción	52
Gráfica 1.16	Reciclado y recuperación de EPS en Europa, 2000 - 2003	53
Gráfica 1.17	Vías de Reciclado de EPS en Europa Occidental, 2003	54
Gráfica 1.18	Composición de los residuos municipales en España por peso, año 2000	54
Gráfica 1.19	Diferentes tipos de plásticos en los residuos municipales	55
Gráfica 1.20	Destino del EPS recuperado en España, 2003	56

ÍNDICE DE GRÁFICAS DEL CAPÍTULO 3

Gráfica 3.1	Usos del EPS en la construcción en España, 2003	82
-------------	---	----

ÍNDICE DE GRÁFICAS DEL CAPÍTULO 4

Gráfica 4.1	Composición por tamaños de residuos de EPS, molido grueso (MG)	117
Gráfica 4.2	Composición por tamaños de residuos de EPS, molido fino (MF)	117

Gráfica 4.3	Comparativo de masas obtenidas para mezclas usando Escayola y Yeso rápido como conglomerante	123
-------------	--	-----

ÍNDICE DE GRÁFICAS DEL CAPÍTULO 6

Gráfica 6.2.1	Absorción total de agua máxima y mínima del ensayo	182
Gráfica 6.2.2	Pérdida de agua en puntos porcentuales entre pesos	183
Gráfica 6.2.3	Comportamiento típico al esfuerzo a la flexión de una probeta comercial comparada con la mezcla 49	195
Gráfica 6.2.4	Comparación de las resistencias máximas a la flexión	196
Gráfica 6.2.5	Comparación entre promedios de zonas dañadas de probetas que no contienen residuos y aquellas que sí los contienen	206
Gráfica 6.2.6	Diámetros y profundidad de huellas promedio por mezcla	211
Gráfica 6.3.1	Resistencia a la compresión alcanzada por cada tipo de material	225
Gráfica 6.3.2	Comparación de las superficies promedio afectadas por el fuego por serie ensayada.	248

ÍNDICE DE GRÁFICAS DEL ANEXO A2

Gráfica A2.1	Relación entre la densidad, el agua de amasado y la porosidad	330
Gráfica A2.2	Relación entre el agua de amasado y la densidad, la absorción y las resistencias a tracción y compresión del yeso	333

ÍNDICE DE GRÁFICAS DEL ANEXO A3

Gráfica A3.1	Comparación de la resistencia a la compresión promedio por tipo de mezcla	352
Gráfica A3.2	Módulos de resistencia promedio de las mezclas ensayadas	364

Índice de figuras

ÍNDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO 1

Figura 1.1	Ecosistema de Tipo I	11
Figura 1.2	Ecosistema de Tipo II	12
Figura 1.3	Ecosistema de Tipo III	12
Figura 1.4	El flujo de materiales y la generación de residuos sólidos en la sociedad tecnológica	18
Figura 1.5	Procesos de reciclaje químico para polímeros de adición	32

ÍNDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO 5

Figura 5.1	Densidades elegidas para la selección de mezclas de placa y panel	152
Figura 5.2	Porcentaje de residuos de EPS en peso que contienen las mezclas seleccionadas de placa (42, 44, 45, 49) y de panel (55, 64, 65, 66) para ensayos	161

ÍNDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO 6

Figura 6.1.1	Conjunto de molde metálico y base de vidrio	172
Figura 6.1.2	Conjunto de molde de madera y base de vidrio	173
Figura 6.2.1	Dibujo de utillaje fabricado para los ensayos de flexión	191
Figura 6.3.1	Representación gráfica de equivalencias de espesores necesarios para obtener el mismo aislamiento de calor de algunos materiales aislantes con relación a la mezcla 65	232

ÍNDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO 7

Figura 7.1	Proporción de relación yeso-agua + residuos de EPS para la placa 49 y proporción escayola-agua + residuos de EPS para el panel 65	288
------------	---	-----

Índice de fotos

ÍNDICE DE FOTOS DEL CAPÍTULO 4

Foto 4.1	Residuos cortados en tiras Corte 4 (C4)	113
Foto 4.2	Residuos cortados en cubo C1	113
Foto 4.3	Residuos molidos (MG), retícula de 1 cm	115
Foto 4.4	Residuo fino (MF), retícula de 1 cm	115
Foto 4.5	Cara de una probeta elaborada con residuos finos de EPS	122
Foto 4.6	Corte transversal de una probeta con residuos de EPS en cubos	122
Foto 4.7	Dorso de una probeta con residuos cortados de EPS en cubos	122
Foto 4.8	Detalle de una probeta fabricada con residuos finos y mezcla rica en agua	124
Foto 4.9	Lateral de una probeta fabricada con tiras cortadas de EPS	124
Foto 4.10	Probeta fabricada con residuos de EPS gruesos y mezcla rica en conglomerante	124

ÍNDICE DE FOTOS DEL CAPÍTULO 5

Foto 5.1	Probeta número 10 elaborada con baja cantidad de agua al 60% y residuos al 0,09%	163
Foto 5.2	Probeta 19 elaborada con residuos en tiras de EPS y agua al 80%	163
Foto 5.3	Probeta 13 elaborada con escayola y agua al 80%, con residuos molido grueso al 0,18%	163
Foto 5.4	Probeta número 16. Ejemplo de flotación de residuos cortados en cubos	163
Foto 5.5	Probeta 23 elaborada con escayola al 80% de agua y residuos al 0,79% (bicapa)	163
Foto 5.6	Probeta 26 ejemplo de amasado para lograr impregnar a los residuos de EPS	163
Foto 5.7	Ejemplo de textura de una probeta con alto contenido de EPS y rica agua	164
Foto 5.8	Probeta 49. Ejemplo de adhesividad aceptable del papel con el núcleo de la probeta	164
Foto 5.9	Probeta 60 elaborada con la preforma número 58	164
Foto 5.10	Probeta 40, fórmula YC100+A100+MG 1.8, primera etapa de selección	164
Foto 5.11	Probeta 41 con fórmula PB+ (YC100+A 120+MG 2), primera etapa de selección	164
Foto 5.12	Probeta 42 con fórmula PC+(YC100+A 120+MG 2), segunda etapa de selección	164
Foto 5.13	Probeta 43 elaborada en dos capas, primera etapa de selección	165
Foto 5.14	Probeta 44 con fórmula PC+(YC100+A 120+MG 3), segunda etapa de selección	165
Foto 5.15	Probeta 45 con fórmula PC+(E100+A 120+MG 3), segunda etapa de selección	165
Foto 5.16	Probeta 49 con fórmula PC+(YR100+A 80+MG 1,6)+PB+AN, segunda etapa de selección	165

Foto 5.17	Probeta 54 con fórmula (E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN, primera etapa de selección	165
Foto 5.18	Probeta 55 con fórmula (E100+A 500+MG 35,1)+PB+AN, segunda etapa de selección	165
Foto 5.19	Probeta 61 con fórmula (E100+A 500+MG 27)+PB, primera etapa de selección	166
Foto 5.20	Probeta 62 con fórmula (E100+A 400+MG 22,5)+PB, primera etapa de selección	166
Foto 5.21	Probeta 63 con fórmula (E100+A 500+MG 27)+PB+AN, primera etapa de selección	166
Foto 5.22	Probeta 64 con fórmula (E100+A 300+MG 14,4)+PB+AN, segunda etapa de selección	166
Foto 5.23	Probeta 65 con fórmula (E100+A 200+MG 8,1)+PB+AN, segunda etapa de selección	166
Foto 5.24	Probeta 66 con fórmula (E100+A 120+MF 6,4)+PB+AN, segunda etapa de selección	166

ÍNDICE DE FOTOS DEL CAPÍTULO 6

Foto 6.1	Molde metálico desarmable para la fabricación de paralelepípedos	174
Foto 6.2	Molde de probetas para el ensayo de compresión de panel	174
Foto 6.3	Adhesividad entre el papel y núcleo en una probeta de placa comercial	212
Foto 6.4	Huella de impacto en la placa A-4 correspondiente a la serie comercial	212
Foto 6.5	Huella de la probeta R (42-44) de escayola 100% + agua al 120%	212
Foto 6.6	Marca de huella sobre el núcleo en la probeta de referencia R(45)	212
Foto 6.7	Huellas sobre probeta con residuos mezcla 45 de placa	213
Foto 6.8	Acercamiento de huella de impacto en una probeta con residuos	213
Foto 6.9	Conjunto de placas de yeso y escayola con residuos preparadas para su ensayo	267
Foto 6.10	Probeta No. 1 de la serie 49 de placa, (300 x 400 x 12,5 mm)	267
Foto 6.11	Probeta de placa de yeso laminado comercial sometida a flexión	267
Foto 6.12	Probeta de placa 3, mezcla 45, resistencia a la flexión de 189,4 N	267
Foto 6.13	Rompimiento poco ramificado de una probeta de Placa Comercial-3	267
Foto 6.14	Probeta 45 de placa sin recubrimiento, ensayo de reacción al fuego	267
Foto 6.15	Zona dañada por el ataque de la llama por un borde en una placa comercial	268
Foto 6.16	Combustión moderada del recubrimiento de la probeta 45-3 de placa	268
Foto 6.17	Área dañada por el fuego en la probeta 42-3 de placa con recubrimiento de papel	268
Foto 6.18	Marca de la huella de impacto en el núcleo de una probeta de placa con EPS	268
Foto 6.19	Marca de la huella de impacto en el núcleo de una probeta de placa con EPS	268
Foto 6.20	Probeta 66-4 de panel sometida al ensayo de compresión	268
Foto 6.21	Probeta de EPS virgen tipo III sometida al ensayo de compresión	269
Foto 6.22	Probeta de la mezcla 65 dentro de la cavidad del molde durante su fraguado	269

Foto 6.23	Probeta número 65-1 recién extraída del molde al inicio del endurecimiento	269
Foto 6.24	Banco de pruebas para el ensayo de flexión de placas y paneles	269
Foto 6.25	Probeta de panel de EPS virgen tipo III, resistencia a la flexión de 124,6 kPa	269
Foto 6.26	Probeta de panel mezcla 65 sometida al ensayo de flexión	269
Foto 6.27	Probeta de la mezcla 66 de panel sometida al ensayo de flexión	270
Foto 6.28	Rompimiento de la probeta 65-3 de panel con una fractura regular, ensayo de flexión	270
Foto 6.29	Probeta de panel de EPS virgen tipo III sometidas al ataque de la llama	270
Foto 6.30	Probetas de panel de EPS virgen antes y después del ensayo de reacción al fuego	270
Foto 6.31	Probeta de panel 66-3 sometida al ataque de la llama durante 60 seg	270
Foto 6.32	Detalle de los huecos que ha dejado la combustión en la superficie de una probeta	270

Índice de símbolos y unidades

A	Es la superficie de las placas ensayadas	m^2
A_0	Es la sección transversal inicial de la probeta	mm^2
b	Es la anchura de la probeta	mm
bx	Es la media aritmética de la anchura	mm
d	Es el espesor de la probeta	mm
di	Es la producción de gotas o partículas inflamadas	unidad
dx	Es el espesor promedio	mm
F_{10}	Es la fuerza correspondiente a una deformación relativa del 10%	N
F_R	Es la fuerza máxima de aplicación	kN
H	Es la huella producida por un impacto	mm
HR	Es la humedad relativa	%
l	Es la longitud	mm
L	Es la distancia entre apoyos	mm
lx	Es la media aritmética de la longitud	mm
λ	Es la conductividad térmica	W/m·K
m	Es la masa	kg
M	Es la masa por unidad de superficie	kg/m ²
M	Es la media aritmética de la masa por unidad de superficie	kg/m ²
m_0	Es la masa seca de la probeta	g
M_1	Es la masa seca promedio por tipo de mezcla	g
M_2	Es la masa promedio después de la inmersión	g
m_x	Es la masa húmeda para el período correspondiente	g
mx	Es la media aritmética de las pesadas de las probetas	kg
P	Es la carga de rotura	N
P	Es la profundidad máxima de la huella	mm
ρ	Es la densidad aparente	kg/m ³

ρ	Es la densidad aparente promedio por serie	kg/m ³
ρ_{H_2O}	Es la densidad aparente del agua	g/cm ³
P_x	Es el promedio de la profundidad máxima de la huella	mm
R	Es la resistencia térmica	m ² ·K/W
S_i	Es la opacidad de humos	
σ_{10}	Es el esfuerzo de compresión al 10% de deformación relativa	kPa
σ_b	Es la resistencia a la flexión	kPa
σ_c	Es la resistencia mecánica a la compresión	N/mm ²
T_1	Es la media de la temperatura del lado caliente de la probeta	K
T_2	Es la media de la temperatura del lado frío de la probeta	K
V	Es el volumen	mm ³
V_{Δ}	Es la absorción promedio de agua de la mezcla en volumen con relación al volumen seco	%
V_x	Es el volumen promedio de la mezcla	cm ³
Δ	Es el incremento porcentual de la masa de la probeta	%
Δ_x	Es el incremento porcentual con relación al peso seco	%

1

INTRODUCCIÓN



1 INTRODUCCIÓN

En este documento de tesis se expone el estudio a la propuesta de un grupo de nuevos materiales compuestos, que resultan al mezclar residuos acondicionados de espuma de plástico y un conglomerante hidráulico común en la construcción, a los cuales pueden acompañar otros materiales secundarios como cartón o papel.

La forma propuesta de reciclaje de los plásticos, busca colaborar a la reducción del problema de la gestión de los residuos de plásticos celulares que se producen en las ciudades. Principalmente el tema se ocupa de aquellos que provienen de aplicaciones de envase y embalaje que, por sus características de uso y después de una corta vida útil, son dispuestos para el flujo de residuos en grandes cantidades y cuando sus propiedades como espumas se encuentran generalmente intactas.

Este esfuerzo busca presentar una alternativa para conservar la utilidad y alargar el ciclo de vida de los residuos de este tipo, lo que en principio coopera a disminuir las cantidades de plástico para ser reciclados o revalorados y, en el caso más indeseable, a postergar su depósito en el vertedero.

El progreso y bienestar que hoy gozan en los países industrializados también se refleja en efectos indeseados, como son severos impactos al medioambiente a escala local y global, producto de un consumo desenfrenado de recursos en materiales y energía. Hay otras muchas señales que nos indican la falta de sostenibilidad de nuestras formas de producir, comerciar y consumir. Un mensaje claro de los desajustes del estilo de vida con el entorno, es la evidente acumulación de residuos que se vierten en mayor o menor escala y con diferentes características en la mayoría de las sociedades del mundo. El problema de los residuos es un mal de hoy, difícil de soportar pero factible de atender para reducir sus consecuencias [FERR00].

De manera consistente crece en la sociedad el convencimiento de la necesidad por reducir la cantidad de residuos de plástico. Para lograrlo, son condiciones el disminuir el consumo de los mismos y después aumentar el reciclaje de estos materiales y para ello se han desarrollado diversas técnicas que buscan retornar al ciclo industrial a los residuos de plástico, conservando de la mejor manera sus propiedades originales.

Desde nuestras posibilidades, buscando aportar a la mejora del medioambiente por medio del reciclaje de residuos de espumas de plástico, nos hemos propuesto mostrar una forma novedosa y sencilla de alargar la vida útil de esos materiales y que pretende por un lado, disminuir la demanda de materiales vírgenes de espumas de EPS y por otro lado, disminuir también la presión al medio que significan la presencia de residuos de difícil tratamiento. Además, el desarrollo de los nuevos materiales permite ofrecer productos para la construcción que cooperen al uso eficiente de la energía en las edificaciones.

1.1 ORIGEN DEL TRABAJO

Si bien es cierto que los procesos industriales de hoy impactan al medioambiente, también ha de reconocerse que esos procesos apoyados en la tecnología actual se hacen más eficientes,

y permiten el diseño y la fabricación de mejores productos en términos del cumplimiento de sus funciones, su disponibilidad y su precio.

Sin embargo la riqueza de las naciones desarrolladas (y de las capas favorecidas de otras sociedades), se traducen en un bienestar económico sin precedentes y en un estilo de vida que favorece el consumo intenso de productos de todo tipo, que para su manejo y distribución han de ser contenidos, mercadeados y protegidos por envases y embalajes de múltiples diseños y fabricados con una gran variedad de materiales. El uso de envases y embalajes no es un fenómeno nuevo en la historia del mundo; lo que los distingue actualmente es su variedad de formas y su corta vida útil que resulta de la tendencia al usar y tirar, además del uso de múltiples tipos de materiales sintéticos de difícil reintegración a la naturaleza; todo esto al mismo tiempo provoca una enorme cantidad de residuos de envases y embalajes. Entre esos residuos encontramos a las espumas de plástico que por sus características propias agregan mayores dificultades a su gestión.

El problema de los residuos se ha agudizado en los últimos años y se ha tornado en un asunto preocupante a todos los niveles de gobierno, debido a que cada vez resulta más difícil gestionar las crecientes cantidades de residuos colectados, ya que los recursos e infraestructuras para atenderlos no crecen a la misma velocidad ni proporción. La presión para gestionar los residuos permite desaprovechar la riqueza potencial que hay en los residuos de materiales plásticos, destinándolos a la valoración energética o a ser depositados en un vertedero.

La acumulación de residuos y los recursos disponibles para gestionarlos, son variables que han potenciado diferentes respuestas en muchas zonas del mundo. Así, hay países donde la estrategia se concentra en los esfuerzos para abaratar el traslado desde el punto de generación del residuo al vertedero, con escasas acciones para su reciclaje. En la mayoría de los países de la Unión Europea, se han adoptado políticas comunitarias que privilegian el desarrollo de la recuperación organizada, para lo cual se han elaborado normativas y directivas hacia la gestión y tratamiento eficiente de los residuos.

Por otro lado, el positivo esfuerzo hacia la gestión de residuos de países industrializados, se ha reflejado también en un dinámico desarrollo de tecnologías de todo tipo para la recolección, selección y reciclaje de residuos. La investigación en reciclaje de materiales plásticos tiene un papel importante, que sin embargo está orientada de forma especial hacia la recuperación de un reducido grupo de tipos de polímeros de mayor interés económico y a la obtención de resinas de moldeo, las que por los procesos de reciclaje usualmente empleados, muestran una disminución en sus características comparadas con las resinas vírgenes.

Todo lo descrito anteriormente, nos lleva a que dentro de la innovación tecnológica hoy se abre un campo multidisciplinario, donde la ingeniería y el diseño de productos tienen una gran oportunidad para cooperar a la mejora en la gestión de residuos de plástico, proponiendo nuevas técnicas para la recolección, selección y tratamiento de residuos de este tipo, que no degraden sus características y que permitan su mejor aprovechamiento a través del diseño de productos fabricados con esos plásticos reciclados.

No es posible aún el desarrollo de productos que no impacten en alguna medida al medio, sin embargo los encargados de la transformación de recursos, entre ellos el diseñador industrial, podrán influir en decisiones que minimicen esos impactos y para ello tendrá que considerar:

- Diseñar productos que empleen menos energía, al mismo tiempo que se utilicen procesos que aprovechen la energía de manera eficiente.
- Procurar el uso de materiales que provengan de recursos renovables y preferentemente usar materiales de reciclado.
- Extender por medio del diseño la vida útil de los productos, permitiendo su mantenimiento o reparación.

- Fomentar el reuso o el reciclaje a través del mismo diseño del producto.
- Eliminar procesos o productos peligrosos para los que los fabrican o peligrosos al entorno del lugar donde se producen.

1.2 CAMPOS DE ACCIÓN

1.2.1 MEDIOAMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD

Desde finales del siglo XIX, la ciencia comenzó a desarrollar nuevas ramas, donde su unidad básica de estudio es el Ecosistema y a través de sus trabajos hoy sabemos que efectivamente se producen graves alteraciones en nuestro entorno y que en el origen de estos cambios participan las actividades de los seres humanos. La pérdida de biodiversidad, el aumento de las concentraciones de productos tóxicos en el medio ambiente, la erosión de tierras, la disminución de la capa de ozono de la estratosfera, la lluvia ácida, el cambio climático y el agotamiento de los recursos no renovables, entre otros muchos más, son tan sólo síntomas populares de los daños que se han producido por la indiscriminada apropiación de la biosfera por el ser humano.

1.2.1.1 Algunos antecedentes del pensamiento medioambiental

No obstante la preocupación actual sobre los temas medioambientales, podemos encontrar en el pasado reciente voces inquietas por el entorno entre ellas las obras de Rachel Carson [2002] especialmente *Primavera Silenciosa* (1964). El trabajo de Carson fue duramente atacado, ya que en el fondo lo que planteaba la investigadora era la responsabilidad de la sociedad industrializada en los daños al ambiente como costo asociado al progreso.

Carson también provocó reacciones positivas y continuadoras; uno de ellos fue el Informe al Club de Roma sobre los límites del crecimiento [MEAD72] y de la explosión demográfica y de una dramática disminución en la producción de alimentos debida principalmente por alteraciones sustanciales en el clima [ERLIC71].

Para el año de 1980 y dentro del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) la Unión Internacional de la Conservación de la Naturaleza propuso una *Estrategia* y que obedecía a las siguientes razones:

- La constatación de que los recursos vivos necesarios para la supervivencia y desarrollo de las sociedades humanas se agotan de manera por demás acelerada y creciente. De la misma manera aumentan las demandas de estos recursos, a lo que ahora ya se agrega un nuevo componente, que es una desproporcionada demanda por parte de los países desarrollados.
- Otra razón, es la certeza que cualquier acción tendiente a enfrentar los problemas ambientales requiere de un período amplio de tiempo para planificar, implementar y operar. Mientras antes se empezaran los trabajos, menores serían los problemas a atender.

En el año de 1983 la Organización de las Naciones Unidas creó la Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo. Esta Comisión (*Brundland Comission*) presentó en el año de 1987 su informe final el cual señala los peligros que enfrenta el planeta y propone acciones a realizar para asegurar la continuidad del progreso humano.

En el año de 1990 se presentó el informe de seguimiento de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, el cual define con más fineza los contenidos del concepto “Desarrollo Sostenible” y marca los retos más importantes:

- Evitar la destrucción de la biosfera y sus ecosistemas. Los sistemas de producción y consumo sobre todo en los países desarrollados son insostenibles, siendo el origen de incontables problemas ambientales y que comprometen las opciones de generaciones futuras.
- Para el logro del Desarrollo Sostenible, las políticas partirán del principio de la precaución; esto es previniendo y atacando las causas de la degradación ambiental.
- Los problemas ambientales demandan la aplicación más amplia y sistemática de la ciencia. La *Bruntland Commission* invita a la Comunidad Científica del mundo a contribuir con sus conocimientos a la promoción de políticas y programas para desarrollo sostenible.
- El Desarrollo Sostenible a cualquier nivel requiere de cambios fundamentales en los valores humanos hacia el medioambiente y los patrones de consumo, así como también la puesta en marcha de Instituciones y procesos democráticos.
- Una Segunda Estrategia “Cuidemos la Tierra” se anexó en 1990 al Informe Bruntland. La primera estrategia promovió un nuevo mensaje: *la conservación no se opone al desarrollo*. Da importancia al hecho que la conservación incluye tanto la protección del medioambiente como de los recursos naturales, todo ello como condición para lograr una vida digna tanto para las presentes como para las futuras generaciones. Declaró que la conservación no es posible sin la disminución de los niveles de pobreza y miseria en la que viven millones de seres humanos.
- “Cuidemos la Tierra”, propone ayudar a mejorar las condiciones de vida de los seres humanos de todo el mundo para lo cual demanda:
 - a. Un compromiso claramente entendido de asumir una nueva ética; la de una vida de manera sostenible.
 - b. Integrar la conservación al desarrollo; conservación para mantenernos dentro de las capacidades del entorno y desarrollo para que cualquier ser en cualquier lugar del planeta tenga una vida larga, saludable y satisfactoria.
 - c. El principio rector para una sociedad sostenible es el respeto hacia otras personas y otras formas de vida, ahora y en el futuro.
 - d. Mantenerse dentro de los niveles de “capacidad de carga del planeta”, o sea dentro de la capacidad de la tierra de absorber los impactos generados por la actividad humana sin llegar a deterioros peligrosos.

1.2.1.1.a La Reunión de Río de Janeiro

Esta Reunión representa una referencia hacia una nueva forma de percibir el futuro y es también la toma de conciencia acerca del problema por parte de la Sociedad en términos más amplios.

Los logros más importantes se determinan los objetivos siguientes:

- Establecer una alianza mundial, nueva y equitativa con nuevos niveles de cooperación entre las personas, los sectores y los Estados.

- Lograr acuerdos internacionales en los cuales se respeten los intereses de todos y se produzca la integridad del sistema ambiental y el desarrollo mundial.
- Se reconozca una naturaleza integrada e interdependiente como el hogar de todos.

Una aportación esencial de la Reunión es la denominada Agenda 21 [1992], que hace referencia a un plan de acción que cubre temas económicos, sociales, culturales y de protección al medio ambiente. A través de la elaboración y aplicación de estrategias para detener y revertir los efectos de la degradación ambiental, al tiempo que busca promover el desarrollo a partir de las mismas administraciones locales.

Agenda 21 identifica las áreas problemáticas donde puede participar el diseño, aunque muchas de ellas no corresponden a la percepción tradicional del trabajo que realiza un diseñador. El documento es directo en plantear los retos que ha de atender la humanidad para lograr un planeta sostenible:

“El lograr un nivel de vida sostenible para todo ser humano requiere una nueva actitud, una actitud de respeto por el medioambiente global. Una extensa variedad de técnicas pueden ser usadas para lograr este fin. Mayor eficiencia en el uso de los recursos limitados del planeta, minimizar los residuos, y cambios fundamentales en los procesos de producción donde se pueden aplicar diversos métodos” [UNO92] (traducción del autor).

Esta tarea se divide en seis grandes temas:

- Calidad de vida
- Uso eficiente de recursos
- Protección de entornos comunes a las naciones
- Manejo de los asentamientos humanos
- Uso de químicos y el manejo de los desechos industriales
- Fomento al crecimiento económico sostenible a escala mundial

Dentro de cada tema hay una lista de tareas por cumplir. Entre aquellos que representan una oportunidad de *participación para el diseño*, se incluyen la investigación y el desarrollo de tecnologías energéticas sostenibles y renovables, reintegración a los ecosistemas de productos de desecho, alterar patrones de consumo no sostenible, optimizar y disminuir el uso de envases y embalajes, desarrollar nuevas tecnologías para la salud en especial para zonas rurales o donde no están disponibles las facilidades convencionales, fomentar la movilidad sostenible, *desarrollar productos atractivos y con valor agregado aprovechando materiales reciclados*, desarrollar tecnología que disminuya los residuos industriales, cooperar al desarrollo de turismo sostenible, fomentado un uso racional de los recursos que provienen del bosque, cooperar a el desarrollo de normas y reglamentos para el diseño de nuevos productos de menor impacto ambiental, desarrollar nuevas técnicas y equipos para el monitoreo del uso de recursos, cooperar con las poblaciones locales para el desarrollo de centros productivos respetuosos del medio.

1.2.1.1.b Johannesburgo 2002. La Cumbre Mundial sobre desarrollo sostenible

Cuando esto se escribe se cumple más de una década de la célebre Reunión de Río y que marcó un parteaguas en la historia de la búsqueda de la sostenibilidad. Cinco años después la comunidad internacional se reunió en Nueva York con el fin de evaluar los progresos hasta

entonces logrados. En aquellas fechas el consenso mayoritario se resumió en que la aplicación de la Agenda 21 mostraba avances aún más lentos que los esperados [PUJOL02].

La conclusión general señala que, aunque se encontró algún progreso en la búsqueda del desarrollo sostenible para los objetivos marcados por la Agenda 21, el camino por recorrer aún era muy largo.

La Reunión de Johannesburgo 2002 se presentó como una oportunidad clave para evaluar los avances en las acciones para la aplicación de estrategias nacionales de desarrollo sostenible, de conformidad como lo establece la mencionada Agenda 21; así también, la reunión buscó movilizar de nuevo la voluntad política y los recursos de todas las naciones participantes, de acuerdo a un escenario diferente a aquel de la Reunión de Río.

Los especialistas coinciden en que la diferencia principal entre las dos primeras Reuniones (Estocolmo 1972 y Río de Janeiro) y la de Johannesburgo, es que hoy los conocimientos sobre nuestro planeta son más amplios y que éstos señalan con toda claridad la necesidad urgente de redireccionar el accionar de las sociedades actuales. También hay que tener en cuenta aspectos puntuales de seguridad ambiental, como son la gestión del agua, los límites de los recursos pesqueros, la seguridad alimentaria o los flujos migratorios provocados por cuestiones del entorno.

Los objetivos de la reunión 2002 se podrían resumir en dos principales:

- Evaluación del progreso en la implementación de la Agenda 21.
- Consensuar y potenciar un plan de acción que promueva el desarrollo de programas políticos a favor de la sostenibilidad en todo el mundo.

La reunión prestó atención especial a cinco áreas: agua, energía, sanidad, agricultura y biodiversidad. Estos temas además de los de pobreza, población, la situación particular de África y los aspectos de comercio y financiamiento, constituyeron la agenda de los delegados.

Resulta difícil determinar el grado de éxito o fracaso del evento. La Reunión fue clausurada por un lado con una muy moderada satisfacción de la Organización de las Naciones Unidas y de algunas delegaciones y por otro lado con críticas y frustraciones de los países en vías de desarrollo, pero sobre todo de las organizaciones no gubernamentales, quienes abiertamente señalan que la conferencia fracasó al faltar el establecimiento de medidas concretas y fechas para promover el desarrollo sostenible.

En cuanto a los resultados políticos, se materializaron en una debilitada Declaración y un plan de acción poco ambiciosos, donde los países asumen *“una responsabilidad colectiva para hacer avanzar y reforzar la interdependencia y soporte mutuo entre los pilares del desarrollo sostenible, desarrollo económico, desarrollo social y protección al medio ambiente a nivel local, nacional, regional y global”*. Pujol [2002] señala que aparte de un compromiso de luchar contra la pobreza en el plan de Acción, sólo destacan los objetivos de reducir las poblaciones sin agua potable y el saneamiento de las aguas residuales para el año 2015. En cambio entre las críticas más severas, destacan la no inclusión de objetivos concretos para fomentar las energías renovables.

1.2.1.1.c El concepto “Desarrollo Sostenible”

La expresión “desarrollo sostenible” es de uso común hoy día como insiste Bifani [99] ... *“se ha generalizado y ha llegado a ser una palabra fetiche, una consigna para políticos y gobiernos, un mandato para las organizaciones internacionales y un slogan para los ambientalistas”*... el concepto es ciertamente complejo y requiere de algunas consideraciones.

“Desarrollo Sostenible” o también “Desarrollo Sustentable” es una traducción de la expresión inglesa “*Sustainable Development*” y es aquí donde habrá que poner atención en las diferencias:

Sustainable no tiene la misma connotación que el término español sostener o sustentar cuyo significado es «mantener firme un objeto, prestar apoyo, mantener una cosa en un medio o lugar sin dejarlo caer o haciéndolo muy lentamente, sufrir, tolerar o conservar una cosa en su ser o estado»...éstas están también en el vocablo inglés, pero en este último tiene una connotación dinámica positiva: *to keep going continuously, endure without giving way*...«mantener la marcha, resistir sin ceder, perseverar en el esfuerzo». Con estas ideas podemos fácilmente observar que la intención en idioma inglés es la de mostrar la dinámica del concepto, que avanza; mientras en castellano la idea tiende más a entenderse como la búsqueda de que algo no caiga, esto es de carácter estático. La diferencia es muy fina pero nítida y puede resultar de importancia en discusiones asociadas al término.

La *World Commission on Environment and Development* (WCED) define al Desarrollo Sostenible como “aquel que satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas”.

Esta definición ha sido ampliamente criticada por la ambigüedad que muestra, con interpretaciones que pueden inclusive ser contradictorias; decir crecimiento sostenible es una contradicción, ya que nada en el mundo de la física puede crecer indefinidamente. Otras confusiones provienen de términos que se han utilizado simplemente intercambiándolos por desarrollo sostenible [BOADA98]...«uso sostenible” se aplica únicamente a los recursos renovables: significa que se utilizan en proporciones que están dentro de la capacidad de renovación... una “Economía Sostenible” es el producto del desarrollo sostenible. Mantiene la base de recursos naturales y puede continuar el desarrollo adaptándose y mejorando los conocimientos, la organización, la eficiencia, la técnica”».

Algunas ideas finales acerca del pensamiento ambiental y del desarrollo sostenible son las siguientes :

- El pensamiento tiene una gran cantidad de detractores y falsos simpatizantes, porque se dirige al pleno corazón del pensamiento económico moderno: el crecimiento continuo como necesidad, que insiste que no hay problema en ser cada vez más rico ya que siempre habrá recursos para reparar los daños.
- Lo que se percibía como una idea propia de los países desarrollados por un medio sano y agradable, hoy es una problemática de suma complejidad que se presenta y se percibe de forma diferente en las comunidades del mundo.
- La diferencia básica entre los países desarrollados y aquellos no desarrollados con respecto al medioambiente, es el nivel de bienestar. Para los primeros se centra en la calidad de vida, ya que los niveles de supervivencia han sido desde hace mucho ostensiblemente superados, mientras que en los países no desarrollados y dentro de una gama de variables que se muestran diferentes, la preocupación medular es como hacer uso de los sistemas naturales para acelerar el desarrollo y el crecimiento; aún conscientes de los peligros ambientales que asechan hay que enfrentar la tarea urgente o inmediata de superar la pobreza.
- Es preocupante observar que no obstante el enorme conjunto de conocimientos tecnológicos hoy disponibles, los indicadores llaman a una cada vez mayor brecha entre pobres y ricos.
- La falta de acceso al conocimiento científico-tecnológico se muestra como uno de los mayores obstáculos para lograr el desarrollo sostenible. Es causa de conflictos sociales, políticos y económicos que muchas veces son motivos para la carencia de una vida digna de grandes grupos humanos.

- Algunos problemas (como el deterioro de la capa de ozono y la gestión de residuos de alimentos) se originan de la dinámica del consumo en los países desarrollados, de tal suerte que son mejor dicho, efectos de la sociedad sobre el medio. Para otros grupos seres humanos que duramente logran sobrevivir, la misma problemática apenas se percibe o carece de sentido.
- En los países subdesarrollados, los problemas relativos al medioambiente surgen de la presión ejercida por poblaciones apremiadas por las necesidades más elementales y la ignorancia, que buscan extraer recursos más allá de las posibilidades del entorno, presos de lo inmediato.
- Dos reflexiones permiten terminar; primero, el constatar que la sociedad se sensibiliza cada vez más ante el hecho de que el ser humano vive en sistemas diferentes, pero estrechamente interconectados y que cualquier acción trasciende fronteras e ideologías. Por último, que la atención a los impactos producidos por la mano del hombre requiere de una estrategia global coordinada que posibilite el desarrollo sostenible y cuya meta simple, pero más importante, es un mundo más justo y digno para todos.

1.2.1.2 Productos, Residuos y Sostenibilidad

La comprensión del papel que juegan los productos industriales en la sostenibilidad demanda un acercamiento al sistema actual de la producción y el consumo.

Las empresas o productos absorben y transforman un conjunto de recursos provenientes del medioambiente, ya sea como energía o como materiales, para convertirlos en bienes que buscan satisfacer las necesidades de los consumidores. Los satisfactores cuyo uso puede ser desde sólo unos instantes (como un embalaje) a uno muy prolongado, pasan finalmente a ser residuos y como tales, vertidos al ambiente donde se reconvierten a través de diversos procesos en nuevos recursos lo que en teoría cierra el ciclo; a todo este proceso le llamamos *reciclaje*. Se da también otro tipo de reciclaje que consiste en recuperar parte de los residuos y directamente incorporarlos al proceso de producción y utilizarlos para fabricar nuevos productos.

Podemos observar que, de manera general, las actividades de producción de satisfactores ejercen una presión doble sobre el medio ambiente, primero para extraer recursos y después para deshacernos de los desechos resultantes del uso y vertido de los productos. Ambos extremos están fuertemente relacionados ya que, en términos amplios, el flujo de desechos al medio es igual al flujo de recursos que extraemos de él, en otras palabras lo que extraemos lo hemos de desechar tarde o temprano. Si aumenta la cantidad de satisfactores presentes en la sociedad, la demanda de recursos para fabricarlos también habrá aumentado, al tiempo que la cantidad de residuos a ser vertidos. Ese aumento en la extracción de recursos materiales y energéticos elevará la presión sobre los recursos no renovables y tenderá a explotar en exceso a los recursos renovables.

Al presentarse una mayor cantidad de residuos podrá superarse la capacidad de absorción del medio, haciendo cada vez más lento el proceso. Ya sea por la intensidad en la extracción de recursos o por el aumento en las cantidades y cualidades del vertido, la situación al respecto de los residuos bajo estas características se torna claramente insostenible.

Si trasladamos lo explicado a una situación de escala planetaria no resulta difícil obtener conclusiones inquietantes [ALMEN93]: desde principios del siglo XX el Producto Mundial Bruto (PMB) ha multiplicado treinta veces el flujo de bienes y servicios, lo que ha demandado un incremento de energía en quince veces y han aumentado doce veces las emisiones de bióxido

de carbono provenientes de los combustibles fósiles; todo esto con graves impactos para el entorno global, provocando una situación insostenible.

¿Que respuestas tenemos al problema? Han sido muchas y de todo tipo; aquí revisaremos algunos conceptos que pueden resultar útiles hacia el diseño de los productos y los procesos más respetuoso del medio ambiente. Tal es el caso del Ecosistema Natural y Ecología Industrial.

1.2.1.2.a Principios naturales en la ecología industrial

La Ecología Industrial se apoya en una idea realmente simple: si la biosfera se ha mantenido estable a lo largo de innumerables años estableciendo analogías con los sistemas industriales, se pudiera mantener junto a estos últimos también estable.

Se parte de la idea de que los organismos tienen como característica, la de obtener materia y energía del entorno mediante un complejo sistema de reacciones químicas que se producen al interior de sí mismo y que llamamos *metabolismo*. En las primerísimas épocas de la historia de la vida en la tierra, las células primitivas obtenían sus nutrientes de moléculas orgánicas del medio exterior. La energía se originaba en el proceso de fermentación y de este último resultaba etanol y dióxido de carbono. Entonces los recursos eran tan abundantes y la vida tan escasa, que los seres vivos prácticamente no impactaban sobre la cantidad de los recursos potenciales; de esta manera los procesos de los seres vivos eran independientes de los flujos de materiales de otros procesos. Así denominamos un sistema desestructurado y donde los flujos de materiales son lineales; este es el funcionamiento de un ecosistema Tipo I donde los recursos y los residuos son casi ilimitados (figura 1.1).

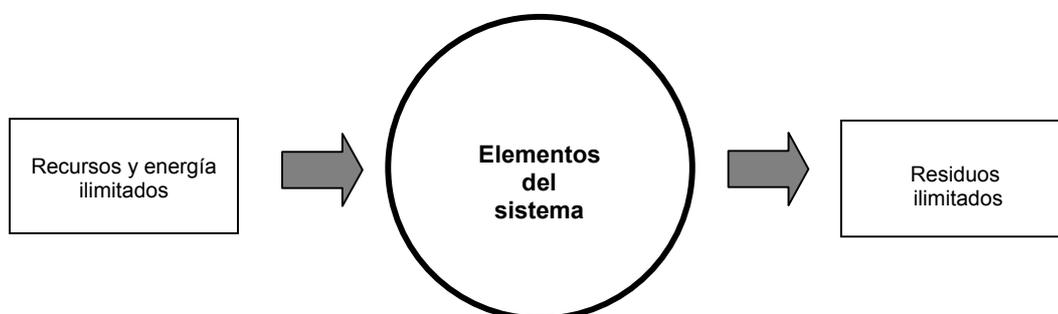


Figura 1.1 Ecosistema de Tipo I

Fuente: Sapiña, F. (2001). *Un futur sostenible?* Valencia: Bromera. p: 155.

El ecosistema Tipo I no fue estable a largo plazo y al aparecer nuevos organismos capaces de reciclar el bióxido de carbono convirtiéndolo en azúcares, el flujo original se cerró y el sistema se estabilizó, dando lugar a que los procesos se interconectarán para organizarse en un Ecosistema denominado de Tipo II, en el cual se produce un reciclaje interno de residuos; también se observan flujos de retroalimentación biológicos dentro del dominio del ecosistema y desde el dominio hacia el exterior del mismo (figura 1.2). En el ecosistema de Tipo II los flujos de recursos se estructuran y dejan de ser lineales, aunque siguen siendo inestables y durarán hasta que se agoten los recursos o hasta que la acumulación de los residuos impidan su funcionamiento.

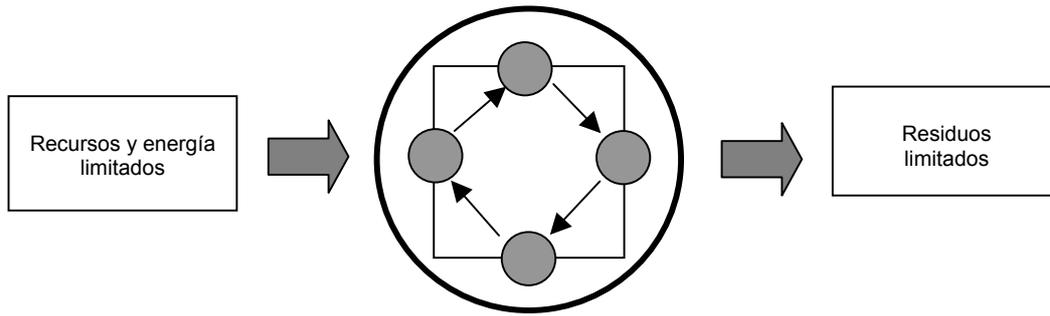


Figura 1.2 Ecosistema de Tipo II

Fuente: Sapiña, F. (2001). *Un futur sostenible?* Valencia: Bromera. p: 156.

El ecosistema Tipo II es mucho más eficiente que aquel Tipo I, aunque no es sostenible por un largo período porque los flujos tienen un solo sentido, lo que desgastará y finalmente agotará los recursos del sistema. Para que los ecosistemas se tornen sostenibles, han evolucionado a uno denominado de Tipo III donde los recursos y los residuos se encuentran indefinidos, porque los residuos de un componente del sistema son recursos para otro; la única demanda de entrada de energía la cumple la radiación solar.

En resumen, la evolución biológica ha solucionado condiciones de inestabilidad o de ciclos abiertos; ha desarrollado nuevos organismos que estabilizan el sistema y cierran los ciclos, al mismo tiempo que sustenta su funcionamiento basado en la luz del sol. Estos son los dos principios básicos que hemos de aplicar al funcionamiento de los sistemas industriales.

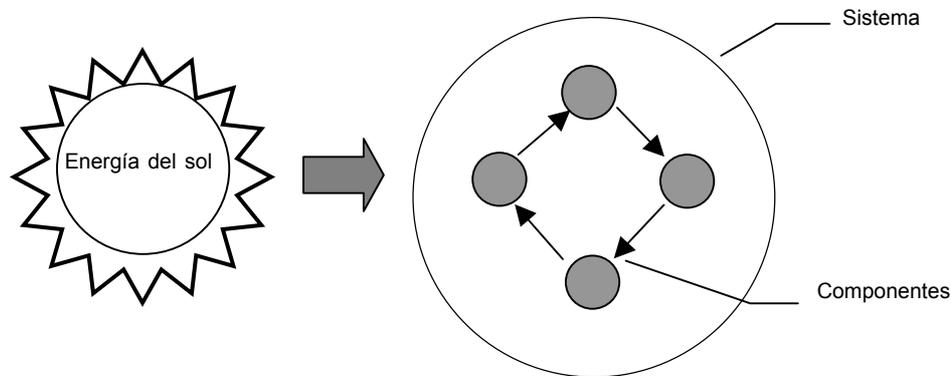


Figura 1.3 Ecosistema de Tipo III

Fuente: Sapiña, F. (2001). *Un futur sostenible?* Valencia: Bromera. p: 157.

El ideal buscado para el uso de materiales y energía en los procesos productivos sería uno inspirado en un ecosistema de Tipo III (figura 1.3). Ahora es conveniente establecer una analogía entre las reacciones al interior de los organismos y las transformaciones que se realizan en la sociedad industrial. El *metabolismo industrial* equivaldría al conjunto que transforma materiales en productos y residuos mediante el trabajo (energía) y para facilitar el análisis, una empresa podría usarse como unidad funcional, de tal manera que sería sencillo observar los flujos de materiales y energía observando sus "fronteras".

Pero existen algunas diferencias entre las empresas y los organismos vivos en un ecosistema; los organismos se reproducen, las empresas producen objetos o servicios pero no otras empresas. Otra diferencia se da en la capacidad de cambio que hay en una empresa, donde en

la mayoría de los casos, éste se podrían dar en poco tiempo; en un ecosistema sus componentes están especializados y los cambios si se producen, requieren larguísimos períodos de adaptación.

El sistema económico podemos resumirlo en un número de empresas que funcionan reguladas por una estructura político-legal común, formado además por trabajadores y consumidores; todo ello asentado en un lugar geográfico limitado. Esto permite el seguimiento de los flujos de materiales y energía.

Así tenemos los ecosistemas industriales como analogía útil de los sistemas biológicos y los elementos necesarios al concepto de *Ecología Industrial: el estudio de las interacciones entre los sistemas industriales y el medioambiente, con el propósito de cooperar a la sociedad sostenible a través de la modificación del ecosistema industrial, para mantenerlo dentro de las capacidades de carga del planeta:*

- La economía de los combustibles de origen fósil se habrá de sustituir por una economía de energía proveniente directa o indirectamente del sol. Tal sería el ejemplo de los residuos orgánicos que, usados convenientemente, permitirían reducir la dependencia de fertilización artificial.
- El ciclo de los materiales abierto desde la Revolución Industrial habrá de cerrarse, cambiando una economía de excesos por una economía de *reducción, reutilización y reciclaje* lo que implica la implantación de diseño de productos y de procesos de alta eficiencia, donde las metas más elevadas de operación serían que cualquier cantidad energía usada en el proceso, se traduzca en una transformación deseada y que cada partícula de material forme parte de un producto útil, mismo que al terminar su ciclo de vida todas sus partes y componentes sirvan para crear otro satisfactor.

Autores como Graedel y Allenby [1996] aseguran la imposibilidad de acceder a esas metas, por lo cual la intención de establecerlas, es la de replantear las estrategias para el diseño del producto y del proceso dentro del proceso económico y de producción, orientado todo ello a un sistema de desarrollo sostenible.

1.2.1.3 Hacia la disminución del impacto de los productos al medioambiente. El ecodiseño.

Hay diferentes estrategias de actuación para disminuir el impacto de los productos durante su ciclo de vida completo desde, actuaciones aisladas que atienden daños puntuales al entorno de un producto o de su proceso, hasta actuaciones amplias como el Ecodiseño que buscan la integración de los aspectos ambientales de manera consistente a todo el proceso de desarrollo del producto, de tal manera que su impacto sobre el medio resulte el menor posible.

Las estrategias de actuación para disminuir el impacto al medioambiente de los productos, se pueden analizar en un orden creciente por su importancia y donde la estrategia de Ecodiseño es la más completa en sus beneficios para el entorno [RIERA99]:

a. Tratamiento de emisiones

Son actuaciones que realizan las empresas al final de los procesos, buscando disminuir los impactos al medioambiente a través del tratamiento de emisiones que resultan de los procesos de producción y que pueden afectar la atmósfera, el suelo o el agua.

b. Reciclaje

El objetivo de esta actuación también centrada en los procesos, es el uso dentro o fuera de la empresa de los materiales sobrantes que resultan de una operación industrial y que pueden ser materia prima para otro proceso.

c. Producción más limpia

La producción más limpia (P+L) se ocupa principalmente de prevenir al medioambiente durante la etapa de producción a través del uso de las mejores tecnologías disponibles, la aplicación de las materias primas menos impactantes y la búsqueda de la mejora en la gestión de los procesos industriales [RIGOL98].

d. Ecodiseño

El ecodiseño es un salto cualitativo en la búsqueda para disminuir el impacto de los productos sobre el medioambiente, ya que cambia la preocupación única por las emisiones en los procesos de producción, por una visión ampliada a todo el ciclo de vida de los productos.

1.2.1.3.a Definiciones de ecodiseño

Son muy variadas las definiciones que proponen los investigadores del área con respecto al ecodiseño y no sólo no hay un consenso acerca del término, sino que tampoco lo hay acerca de sus fronteras con respecto a otras estrategias. Bajo el nombre genérico de *ecodiseño* se engloban diversos términos y filosofías, que muestran el objetivo común de la promoción de productos mejorados desde el punto de vista del medioambiente. El término ecodiseño puede encontrarse atrás de una gran cantidad de nombres apenas diferenciados por matices muy sutiles; aquí algunos entre los más importantes:

- *Design for Environment* (DFE). Diseño para el medioambiente
- *Ecological Design or Green Design*. Diseño ecológico o Diseño verde
- *Industrial Ecology*. Ingeniería Ecológica
- *Life Cycle Design* (LCD). Diseño para el ciclo de vida
- *Life Cycle Engineering* (LCE). Ingeniería para el ciclo de vida

1.2.1.3.b Evolución del ecodiseño

La historia del diseño hacia la obtención productos más respetuosos con el medioambiente es corta pero intensa. Investigadores como Bovea [2002] señalan a Navichandra [1991] como uno de los pioneros del tema, quién definió la Ingeniería Ecológica como el estudio de la compatibilidad entre la evaluación de un producto y/o proceso y el diseño considerando al medioambiente, cuyo resultado es un producto valioso tanto comercialmente como para el entorno.

Posteriormente se propusieron diversas ideas acerca de la armonización de los conceptos tradicionales del diseño de producto con los requerimientos del medioambiente, como es el caso de Keoleian [1994] quien consideró al Diseño para el ciclo de vida como una ampliación

de la Ingeniería concurrente, el cual se añade a otros requerimientos comunes usuales en un proyecto de Diseño.

Por su parte Boothroyd Dewhurst, Inc. & TNO [1996] propone que el DFE es una práctica que consiste en la reducción del impacto ambiental de un producto, y los costes relacionados con ello a través de tomas de decisión correctas en su proceso de diseño. Billatos y Basaly [1997] extienden el concepto de que el DFE es una integración de cualquiera de los campos de la Ingeniería concurrente, como el Diseño para el desensamblaje (*Design for Disassembly*. DFD), el Diseño para el Reciclaje (*Design for Recycling*. DFR), Diseño para la fabricación y el ensamblaje (*Design for Manufacturing and Assembly*. DFA) y cualquier otro Diseño para X (*Design for X DfX*).

La dinámica evolución del DFE siguió, ahora introduciendo abiertamente el concepto y las herramientas del Análisis de Ciclo de Vida y exponiéndolo como un recurso industrial para mejorar la competitividad al disminuir los costes de los productos. Aquí las herramientas de los Análisis de los costes del ciclo de vida es el elemento principal (ASIED98).

Autores como Simon [1996] y Rieradevall y Vinyets [1999] introdujeron el concepto de Sostenibilidad en el diseño del producto, señalando al diseñador como protagonista del proceso. Simon señala dos escenarios para el DFE, uno estrecho entendido como sólo un ajuste de parámetros dentro del proceso de diseño de productos, y otro con una perspectiva más amplia y ambiciosa que involucra los factores políticos, económicos y sociales del diseño. En este segundo escenario, el DFE busca satisfacer no sólo las necesidades del usuario del producto sino de la comunidad que le rodea; así los autores hablan de Desarrollo Sostenible de Productos.

Al respecto de la aplicación del DFE en la industria, numerosos autores le asocian con la Ecología Industrial. Berkel [1997] define a la Ecología Industrial como una herramienta que coopera al desarrollo industrial en equilibrio con el medioambiente sostenible.

Poyner [1995] señala la dificultad de implementar técnicas de DFE en las industrias y señala que éstas aceptan más fácilmente el concepto de Ecología Industrial siguiendo el modelo de Gestión Ambiental tipo EMAS o ISO 14000. Al respecto, Bovea [2002] señala que hoy se da una gran distancia entre la gestión ambiental y el proceso de desarrollo del productos, donde el DFE se encuentra en desventaja, dada la ubicación de prioridades de la gestión medioambiental en la empresa, la cual se centra en problemas concretos de emisiones y el cumplimiento de normas, y la misma autora propone la mayor incorporación de los diseñadores en la cadena de gestión medioambiental.

Podemos decir que hay una gran coincidencia entorno al pensamiento de los investigadores con respecto al tema del ecodiseño y esta es que se trata de considerar los aspectos del medioambiente que se relacionan con un producto a lo largo de todo su ciclo de vida, al tiempo que se busca que las funciones propias del producto sean las más eficientes. Algunos de los objetivos buscados por el ecodiseño sólo se pueden dar de forma satisfactoria si son armonizados durante las primeras etapas en la concepción del producto.

Otros autores apuntan hacia una nueva evolución del concepto del ecodiseño de acuerdo a los fines que persigue su aplicación. Podemos decir que se hace *Ecodiseño para la Ecoeficiencia* cuando a las búsquedas para disminuir el impacto medioambiental del producto, se suman las intenciones de crear valor económico a través de las prestaciones del producto satisfactorias para el usuario a todo lo largo de su ciclo de vida. *Ecodiseño para la Ecoeficiencia* consiste en la capacidad de diseñar o rediseñar productos que cumplan simultáneamente las metas de costos, calidad, rendimiento y la reducción de los impactos ambientales, asociados a todo su ciclo de vida a través de una disminución de las emisiones y la conservación de los recursos materiales y energéticos [RIERA99].

1.2.1.3.c Técnicas del ecodiseño

Los investigadores del área, los cuales se han mencionado en los párrafos anteriores, también han propuesto diversas metodologías y herramientas para el desarrollo de productos atentos a su impacto al medioambiente; en orden cronológico estas son:

- Introducción de indicadores individuales que evalúan aspectos aislados del producto [NAVIC91].
- Métodos matriciales y listas de comprobación [KEOLE94] [GRAED96].

Como resultado de estas dos últimas herramientas, surgieron estrategias o recomendaciones de diseño que se han integrado en las técnicas de Diseño para X [GERST97].

Estas herramientas son de utilidad cuando no se cuenta con información detallada del producto aunque presentan el inconveniente de depender de la opinión del observador.

- Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Ha sido la metodología que más ha impulsado el diseño de productos respetuosos del medioambiente. Es una valiosa herramienta que nos permite conocer la carga ambiental asociada a un producto, proceso o actividad, cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al medioambiente.

La metodología de ACV es una técnica que permite obtener una evaluación ambiental cuantitativa, cosa que no siempre es posible en las a través de las otras herramientas que presentan un alto grado de subjetividad.

1.2.1.3.d Estrategias del ecodiseño

Las herramientas y metodologías del Ecodiseño pueden ser aplicadas en cualquier etapa del ciclo de vida de un producto. En base a la información obtenida de la aplicación de las técnicas acerca del tipo de impacto, su cuantificación y etapa donde se ubica, podemos determinar las estrategias de actuación para la mejora del producto. De entre las propuestas de los investigadores, se expone las categorías y estrategias correspondientes según Keoleian [1994]:

Tabla 1.1 Estrategias generales de diseño según Keoleian

Categoría	Estrategia
Extensión de la vida útil del producto	Duración adecuada Asegurar la adaptabilidad Incrementar la fiabilidad Extender las opciones de servicio Simplificar el mantenimiento Facilitar la reparación Permitir la refabricación Facilitar la reutilización
Extensión de la vida del material	Facilitar el reciclaje Utilizar materiales reciclados
Selección del material	Sustitución de materiales Reformulaciones
Conservación de recursos	Reducción de material
Gestión del producto	Sustituir por procesos mejores Eficiente uso de energía Eficiente uso del material Mejora del control del proceso Control de inventarios Reducción de impactos Adecuado tratamiento
Distribución eficiente	Optimizar el transporte Reducir envases y embalajes Otros materiales de embalaje
Mejora de la gestión	Uso eficiente de materiales Proveedores más responsable Ecoetiquetado y publicidad

La investigación de esta tesis se dirige a atender principalmente la estrategia de *Extensión de la vida del material* a través del uso de materiales reciclados que en este caso son residuos de espuma de EPS.

1.2.2 LOS RESIDUOS

1.2.2.1 Los Residuos Municipales*

* Nota. A lo largo de este documento se usarán indistintamente los términos "Residuos Municipales", "Residuos Sólidos Urbanos" y "Residuos Sólidos". Según lo señalado por el Diccionari de Gestió Ambiental de la Enciclopedia Catalana.

Si bien es cierto que la presencia de residuos ha acompañado al hombre desde su aparición sobre la tierra, también se ha de aceptar que el problema de la evacuación de residuos se

muestra como tal, coincidiendo con el desarrollo tecnológico de los últimos dos siglos o de la *fase de alta energía*. Podemos decir que los beneficios aportados por la tecnología trajeron también el reto de los residuos [XERCA98].

El problema de los residuos hoy en día es de enormes proporciones. Para comprender la naturaleza y dimensiones del problema, Tchobanoglous [1994] propone observar el flujo de materiales en lo que él llama la sociedad tecnológica (figura 1.4). Destaca que desde la extracción de la materia prima hasta la evacuación final del producto fabricado, la presencia de residuos se incrementa en cantidad y se hace más compleja en cada etapa.

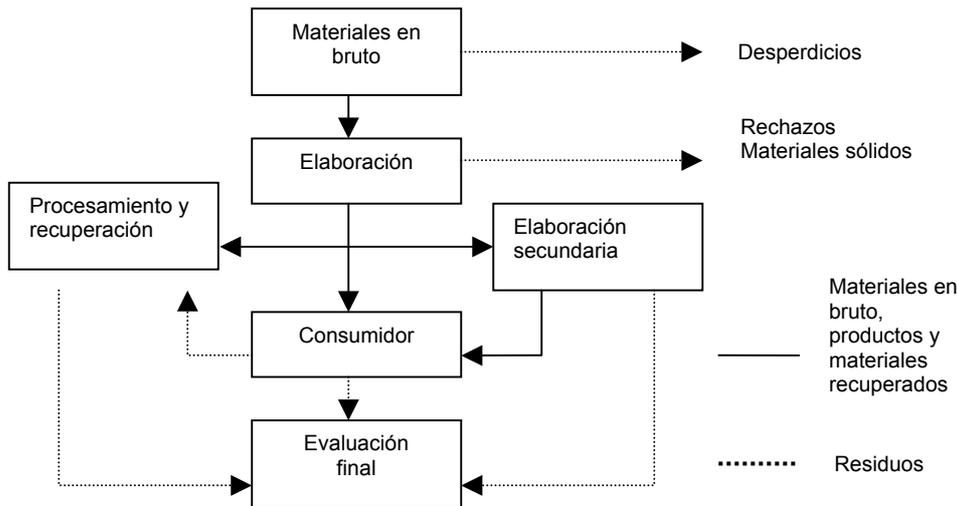


Figura 1.4 El flujo de materiales y la generación de residuos sólidos en la sociedad tecnológica
Fuente: Tchobanoglous G. (1994). *Gestión Integral de residuos sólidos*. Madrid: Mc Graw Hill. p. 7

El Diccionario de Gestión Ambiental de la Enciclopedia Catalana [1997] define residuo como:

“el material que se genera como una consecuencia no deseada de cualquier actividad humana, y que el generador o poseedor del cual se ha desprendido tiene la intención o la obligación de desprenderse”.

Una definición también útil para los fines de este escrito se expresa en la ley española de residuos Ley 10/1998:

Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o Residuos Municipales (RM) son:

“los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares y actividades” [BOE96/98].

Atendiendo la definición, también son RSU los que proceden de la limpieza de las calles, zonas públicas y aquellos que resultan de las obras de reforma domésticas. Para una mayor comprensión del tema, se describen los principales tipos de Residuos Urbanos o Municipales, aunque los Ayuntamientos tienen la potestad de decidir cuales son los residuos que considera urbanos o Municipales y cuales son los Residuos especiales o peligrosos y que por lo tanto se gestionan aparte [FERRER00].

1.2.2.1.a Tipos de Residuos Municipales

Dependiendo del origen de su generación los RSU se clasifican así:

a. Residuos domésticos o domiciliarios

Su origen son las actividades propias de una vivienda. Se muestran en lo general como objetos de dimensiones manipulables por cualquiera persona. Se componen de una fracción orgánica, otra inorgánica y por último de una parte usualmente pequeña de residuos peligrosos como lo son los restos de químicos para aplicaciones de limpieza, solventes, restos de pinturas y baterías.

b. Residuos comerciales y de servicios

Lo constituyen aquellos que se producen en los diferentes flujos de la distribución y el consumo de mercancías. También se incluyen aquí los que se generan durante la prestación de servicios. Por lo general se encuentran los mismos materiales de los residuos domésticos aunque con una composición diferente y está directamente relacionada con el tipo de comercio o servicio del que se trate.

c. Residuos voluminosos

Son aquellos que siendo domésticos o comerciales son de difícil manejo por los medios de recogida convencionales. Estos son los casos de muebles, electrodomésticos, etc.

d. Residuos de construcción y demolición

Se originan en obras de reforma de casas o comercios y están constituidos por piedras, ladrillos, maderas, vidrios, plásticos, tierras, etc.

e. Residuos de servicios municipales

Proviene de las actividades de limpieza y mantenimiento de las ciudades. Los casos comunes son residuos de jardinería, animales muertos, vehículos abandonados, y aquellos que quedan fuera de los contenedores de la recogida.

f. Residuos de plantas de tratamiento

Proviene de las plantas de tratamiento de aguas y potabilización, a los que se suman aquellos residuos que se generan durante el proceso de incineración.

g. Residuos industriales asimilables a urbanos

Comprenden los mismos tipos de residuos que los RSU, aunque su composición es diferente, ya que depende de las actividades de la fuente generadora como son los ejemplos de las carpinterías, paileras y talleres mecánicos. Se consideran también en este apartado los que se producen en los polígonos industriales.

h. Residuos hospitalarios

Son residuos no especializados de atención a la salud, como son los provenientes de ambulatorios, hospitales o centros de investigación médica. Se dividen en residuos asimilables a urbanos, residuos clínicos y residuos especiales.

i. Residuos agrícolas y ganaderos

Se consideran aquí a los que son generados en zonas clasificadas como urbanas y urbanizables. Se componen por lo general de materiales de rápida descomposición y envases de plástico, metal y cartón [FERRER00].

1.2.2.1.b Factores que inciden en la generación de los Residuos Municipales o RSU.

Las cantidades de RSU han aumentado tanto en los países industrializados como en los no industrializados. También se han observado modificaciones en la composición de los residuos, donde ha crecido en especial la participación de los envases y embalajes. Los factores que han cooperado al aumento en la generación de RSU son:

- Crecimiento de la población
- Mejoras en las condiciones de vida
- Intensificación en la cantidad de producción y en la diversificación de los envases y embalajes
- Acelerada obsolescencia en los productos
- Aumento en las actividades que se realizan dentro de las ciudades

En cuanto a los cambios en la composición de los RSU, se encuentran varios factores que lo promueven [TCHOB94] [BOE96/98]:

- Temporada del año en la que se generan
- El clima propio del lugar
- Ubicación geográfica de las poblaciones
- Nivel y modos de vida de los pobladores
- Desplazamientos
- Tipos de población, urbanas, rurales, comerciales, residenciales, etc.
- Tipos de vivienda, casas unifamiliares, edificios, etc.

1.2.2.2 Gestión de Residuos Municipales

De forma consistente crece en la sociedad el convencimiento de la necesidad de disminuir la cantidad de residuos, entre ellos los de plásticos. La atención a lo anterior que implica primero, disminuir el consumo de productos de plásticos y segundo, *aumentar el reciclaje de esos materiales* que han sido desechados por sus generadores. Estas dos acciones se afectan mutuamente y quedan inscritas en un marco complejo de análisis y toma de decisiones que llamamos Gestión de Residuos Sólidos (GRS).

La gestión de residuos sólidos se puede definir como *“la disciplina asociada al control de la generación, almacenamiento, recogida, transferencia, transporte, procesamiento y evacuación de residuos sólidos, de una forma que armoniza con los mejores principios de la salud pública, de la economía, de la ingeniería, de la conservación, de la estética y de otras consideraciones ambientales, y que también responde a las expectativas públicas...Las soluciones pueden implicar relaciones interdisciplinarias complejas como la ciencia política, el urbanismo...así como la ingeniería y la ciencia de los materiales.”* [TCHOB94].

La GRS es considerado un sistema abierto, ya que es un conjunto de partes que se interrelacionan para lograr un fin determinado en un entorno también determinado, que está formado por todo aquello que se encuentra afuera y que rodea e influye de alguna manera el sistema (el medio ambiente circundante, el medio urbano, la sociedad, los fenómenos políticos, etc.). Así una GRS con éxito, es producto de la atención acertada a un problema complejo que comprende elementos más allá de la cantidad, heterogeneidad y ubicación de los residuos.

Para facilitar el análisis del problema se distinguen seis elementos funcionales dentro del mismo:

1. Generación de residuos

Los residuos son identificados como materiales sin interés para su propietario así que los almacena y desecha en forma aislada o agrupada.

2. Manipulación, separación, almacenamiento

La manipulación y separación de residuos en el origen, representa una importante aportación a la GRS de cara a la reutilización y el reciclaje. Cooperar también a hacer eficiente el uso de los recursos destinados a la gestión, ya que permite que se apliquen en otras situaciones más importantes o de riesgo ambiental.

3. Recogida

Comprende por lo general la recogida de los residuos hasta el sitio donde es vaciado el vehículo que los transporta. Este elemento funcional puede representar un alto porcentaje en la estructura de costos de la gestión. Si el residuo se produce en un lugar lejano a su destino, impactará de forma negativa los esfuerzos que se hagan para reaprovecharlo o reciclarlo.

4. Separación, procesamiento y transformación

Incluye la recuperación de materiales que han sido separados en su origen, ya sea en el sitio de su generación o en centros de recogida selectiva. La separación y el procesamiento usualmente se llevan a cabo en instalaciones especiales de recuperación de materiales, estaciones de transferencia y en plantas de incineración.

El procesamiento consiste comúnmente en la separación de los residuos, trituración y la reducción del volumen. Estos productos del procesado tienen como destino el reciclaje, la transformación química a través de la incineración y la transformación biológica a través de la obtención de composta.

5. Transferencia y transporte

Son dos pasos principales los que comprende este elemento funcional:

- a. El llevar el residuo de un vehículo de recogida pequeño a uno de mayor capacidad.

- b. Transportar los residuos a un lugar de tratamiento o evacuación. Como es cada vez más común estos lugares se encuentran alejados de los lugares de generación, así se requiere de equipo de carga de gran capacidad e inclusive de instalaciones especiales, como son los centros de transferencia donde se concentran los residuos para su posterior comercialización por recicladores especializados.

6. Disposición final

La evacuación de los residuos sólidos en vertederos controlados o su extensión sobre la superficie, es el último destino de todos los residuos, sean estos llevados directamente desde su lugar de generación, o que sean residuos procedentes de alguna instalación de recuperación anterior o materiales que provienen de incineradoras o de rechazos de composteo.

Una vez establecidos los principales elementos de la problemática de los residuos y su tipificación, se han desarrollado algunas propuestas que buscan gestionar los residuos de manera que produzcan el menor daño al medioambiente.

1.2.2.3 Propuestas de solución al problema de los Residuos Municipales

La búsqueda de soluciones al problema de los residuos se hace de varias maneras y se ha desarrollado en cuatro etapas [DELAL98]:

- a. Eliminación de residuos ("Waste Disposal"). Corresponde hasta la primera mitad de los años sesentas.
- b. Gestión de residuos ("Waste Management"). Principio de los años setentas.
- c. Reducción de residuos ("Waste Reduction"). Que comprende tecnologías limpias que se desarrollaron en la primera mitad de los años setentas, y finalmente,
- d. Reducción en el origen. Años ochentas.

El problema medioambiental se puede afrontar por dos caminos; uno previniendo la producción de contaminantes ahí donde se forman y dos, eliminándolos una vez que se han presentado siendo esta la estrategia más usada hasta ahora. Sin embargo, las leyes y normas de protección ambiental son cada vez más exigentes y su cumplimiento por parte de los productores demanda gran atención y cada vez más recursos, lo que nos lleva a la conclusión que un proceso que genera residuos es un proceso ineficiente en alguna medida pero también, es una fuente de oportunidades de mejora.

Así los esfuerzos de la sociedad se dirigen ahora hacia la no generación de residuos o a la fabricación de productos que faciliten su propia eliminación, ya sea por su diseño o a través del proceso que los genera. Podemos decir que se puede cooperar a la disminución de residuos:

- Por medio del mismo producto ya que podemos evitar o disminuir el uso de contaminantes en él.
- Promoviendo tecnologías limpias para su producción.
- Recuperando, reciclando y reutilizando los residuos industriales que pueden convertirse nuevamente en materia prima.

En resumen, la protección al ambiente exige disminuir los flujos de residuos y la *minimización* se dirige a lograr esto. Además propone otras acciones paralelas, que son recuperar y reusar aquellos desechos que ha sido imposible no producirlos.

El Banco Mundial incluye tres áreas de trabajo en la Minimización [DELAF97]:

- Reducción en la fuente
- Reciclaje o reuso y,
- Tratamiento

La importancia del Reciclaje y el Reuso en los esfuerzos de Minimización es aún motivo de polémica, ya que los esfuerzos para reducción en la fuente son los que reciben más atención, puesto que comprende acciones de mayor interés para las empresas. Esta falta de consenso resulta evidente; donde para el Banco Mundial el marco conceptual para definir la minimización de residuos, se centra en el proceso productivo y se destaca en la reducción en la fuente y el reciclaje, para la EPA (Environmental Protection Agency) considera al tratamiento de residuos como una actividad fuera del proceso de minimización [DELAF97].

Se ha visto que son poco claras las fronteras dentro del tema de la Minimización; aún se puede discutir mucho acerca de su estructura y alcances. Lo que sí se muestra de manera nítida, es la necesidad de aplicar medidas de este tipo que permitan reducir el impacto de las actividades industriales sobre el medioambiente.

Impedir la generación de residuos en su totalidad es la meta ideal, pero mientras no existan las condiciones para ello se ha de trabajar con otras opciones que ya se han mencionado anteriormente: la Reducción, la Reutilización, el Reciclaje y la Concentración. Todas estas estrategias han de ser observadas dentro del marco del ciclo de vida del producto. En todas sus etapas se dan residuos y con ellos las oportunidades para disminuir la presencia de residuos.

1.2.2.3.a Reducción de los RSU

La forma perfecta para atender a los residuos es que este no se generen. La reducción de la presencia de residuos se puede lograr de varias maneras como pueden ser [DELAL98]:

1. Una mejor gestión administrativa
2. Mejorando los procedimientos de operación al:
 - Promover un correcto mantenimiento de los equipos
 - Transformar en tecnología limpia la maquinaria y equipos que no lo sean

Estos dos puntos quedan englobados dentro de los conceptos de *Producción más limpia* (P+L). La producción más limpia nació dentro del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y que la definió como “La aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva dentro de los procesos, productos y servicios a fin de aumentar la ecoeficiencia y reducir el riesgo para los humanos y el medio ambiente”. La P+L se aplica a [RIGOL98]:

- Los procesos de producción
- Los productos (reduce los impactos negativos a lo largo del ciclo de vida del producto desde la extracción de materias primas hasta su disposición final).

- Los servicios
3. Reduciendo el volumen de los residuos ya sea segregando o concentrando los flujos de residuos desde el origen para favorecer su revaloración y recirculación.

1.2.2.4 Reutilización y Reciclaje

No todos los procesos permiten aplicar con éxito medidas que tienden a la reducción de residuos. Muchos presentan obstáculos técnicos, algunos otros de demandas del mercado que impiden un cambio. Así una vez que se da el residuo, la manera más indicada para disminuir su impacto al medioambiente es volver a utilizarlo.

1.2.2.4.a Tratamiento de residuos

Comprende un conjunto de tecnologías que se aplican buscando disminuir el impacto que provocan los residuos al medioambiente. Son tres los métodos usados en el tratamiento de residuos:

- Tratamientos físicos
Separan los residuos en sus componentes principales.
- Tratamientos químicos
Tienen como objetivo principal la eliminación de los contaminantes en el residuo.
- Tratamientos biológicos
Aplica especialmente a la reducción de materia orgánica a través de promover el desarrollo de microorganismos específicos [CUCUR98].

1.2.3 RECICLAJE DE LOS PLÁSTICOS

1.2.3.1 Algunos antecedentes

Durante el siglo XIX, salvo algunas noticias sobre el reuso de trozado de caucho para fabricar placas aglutinadas de material reciclado con material virgen [DERRY84], no hay documentación o evidencia de un inicio formal del inicio de la recuperación de plásticos. Se puede decir que el interés de la industria en el tema, comenzó cuando se aplicaron por primera vez recortes o excedentes del mismo proceso combinados con resinas vírgenes para producir objetos sin deteriorar notablemente sus características, lo cual siempre se ha presentado como una opción para la disminución de costos [ANARP99]. Sin embargo, mientras la industria de los plásticos crecía rápidamente a partir de las primeras décadas del siglo XX, también aparecieron cantidades sobrantes de los nuevos procesos y sus actividades asociadas; estos residuos en su mayor parte fueron absorbidos por las mismas empresas ya que en lo general eran resinas de pocos tipos y libres de contaminación.

Cuando los mismos procesadores decidieron no formular sus productos con partes de reproceso, alentados por un mercado demandante y prácticamente ninguna restricción ambiental, aparecieron los reprocesadores independientes, quienes usualmente no competían en el mismo segmento de aquellos procesadores primarios. Cuando comenzó esa competencia, los procesadores primarios prefirieron depositar sus residuos a cielo abierto y no venderlos, lo que promovió a la leyenda negra de los plásticos. Al mismo tiempo en los años

sesentas, el precio de la materia prima virgen disminuyó sensiblemente y también los márgenes de ganancia de los reprocesadores, así como el interés por la incipiente industria.

La producción de grandes cantidades de plásticos, el auge de productos fabricados con termoplásticos y la crisis de la industria a principios de los años setenta, fueron sin quererlo algunos de los detonadores de los esfuerzos hechos en las empresas por reaprovechar sus residuos.

Para fines de los años ochentas la industria de la recuperación de plásticos tomó notable impulso debido a la atención generalizada hacia el medioambiente y que se tradujo en presiones sociales para los gobiernos y en lo general para la industria de los plásticos [ANARP99].

Las técnicas de evaluación, selección y reciclaje de plásticos desarrolladas de forma acelerada a finales de los años setenta y principio de los años ochentas, sentaron las bases de los procesos actuales. Esas técnicas se mostrarán más adelante en este documento.

1.2.3.2 La terminología

A lo largo del desarrollo de la industria del reciclaje de plásticos, muchas palabras a fuerza de su uso continuo se han convertido en un lenguaje propio. Diversos autores como Milgrom [1972] y Leidner [1981] intentaron en su momento definir una terminología.

Por su parte la American Society for Testing and Materials [ASTM90] publicó una guía estándar bajo la designación D-5033-90 que define y provee con información acerca de los factores de relevancia para el desarrollo de estándares y su uso apropiado en el reciclaje de plásticos [EHRIG92]. The Society of the Plastics Industry, Inc [SPI92] publicó su "Guide for Standard Worldwide Terminology for use in Recycling of Plastics". Este es el más conocido y usado en el medio de los recicladores españoles debido a su sencillez y difusión hacia el interior de sus asociaciones. La guía SPI se usa como referencia de terminología.

1.2.3.3 Clasificación de tecnologías para el reciclaje de plásticos

Las tecnologías se ordenan por las salidas que ofrecen, ya sean como materiales o como energía. Milgrom fue probablemente el primero en clasificarlos de una manera muy simple: reciclaje primario, secundario y terciario. El primario corresponde al reciclaje del plástico a su "forma original", el secundario es reciclarlo en una forma diferente y el terciario es la conversión del plástico a energía o a un producto no plástico.

La SPI las define y clasifica así [SPI92]:

1.2.3.3.a Reciclaje primario

Consiste en la conversión mecánica del residuo de plástico en presencia de calor. El reciclaje primario se aplica en materiales termoplásticos, principalmente debido a la propiedad que le permite reblandecer a altas temperaturas sin daños apreciables en sus características.

1.2.3.3.b Reciclaje secundario

El reciclaje secundario convierte al plástico en un material con propiedades muy inferiores a las de la resina original. Los termofijos y los plásticos contaminados son

ejemplos de los materiales a recuperar a través de esta técnica. Este proceso muchas veces elimina la necesidad de separar y limpiar los materiales a reciclar, ya que éstos se trituran en el estado en que se encuentran y son transformados en pequeños barriles que llamamos “pellets”, o bien en granza u hojuelas para después ser conducidos a otros procesos de moldeo.

1.2.3.3.c Reciclaje terciario

Esta técnica degrada el polímero a compuestos básicos y combustibles; por ello es fundamentalmente diferente a las técnicas anteriores porque involucra no sólo un cambio físico sino además uno químico. En este proceso, las largas cadenas de polímeros son forzadas en pequeños hidrocarburos o monómeros o en monóxido de carbono e hidrógeno.

1.2.3.3.d Reciclaje cuaternario

Consiste en el calentamiento del plástico con el fin de usar la energía térmica que libera para llevar a cabo otros procesos, es decir, el plástico es usado como combustible con objeto de reciclar la energía. Puede incluirse aquí la incineración, siempre que la recuperación sea acompañada de un generador de vapor.

Las ventajas de la incineración son: el mucho menor espacio ocupado en los rellenos sanitarios, la recuperación de metales y el manejo de diferentes cantidades de desechos. Sin embargo las dos grandes desventajas de este proceso son su alto costo de instalación y operación y la generación de contaminantes.

Este documento no está estructurado según la clasificación anterior pero consideramos que los procesos que se describen son representativos de los cuatro tipos de reciclaje, al tiempo que son fácilmente reconocibles. No hacemos énfasis en el reciclaje primario ya que usualmente no involucra entradas que provienen de residuos. En el reciclaje secundario reciben especial atención los materiales termoplásticos. Los reciclajes primarios y secundarios se manejarán de igual manera dentro del término “reciclaje mecánico”; el reciclado terciario se atiende en el “reciclaje químico”. El reciclaje cuaternario se considera como una forma de recuperación y no de reciclaje por lo no se atiende en este reporte.

1.2.3.4 Actividades asociadas al reciclaje de plásticos

Muchas de las empresas que recuperan y reciclan plásticos son organizaciones pequeñas y poco maduras. Su fragilidad económica propicia que declinen y desaparezcan con facilidad. La tecnología empleada en sus instalaciones frecuentemente es desarrollada en la misma empresa y no está protegida por patentes. También es usual que su maquinaria sea adaptada de otros equipos que participan en la fabricación de artículos utilizando materia prima virgen.

Por otro lado los grandes fabricantes de materias primas apenas comienzan a ofrecer en el mercado resinas que contienen porcentajes de plástico reciclado. Sin duda, la industria química y petroquímica presionadas por la opinión pública, los gobiernos y los mercados de materiales plásticos, tienen puesta su atención en los reportes de investigación sobre el reciclaje de residuos de plástico. De cualquier manera el tamaño de su participación y el momento en que esto suceda son aún inciertos.

Las actividades asociadas a el reciclaje de plástico involucran la participación de tres áreas de la industria:

1. *Recolectores de residuos de plástico*

Atienden programas de reciclaje o pueden comprar los residuos directamente al productor.

2. *Plantas de recepción y separación de residuos*

Dividen los flujos de residuos (públicos y privados) en fracciones comercializables para ser posteriormente procesadas, por ejemplo, vidrio, cartón, etc.

3. *Recicladores*

Acondicionan los materiales plásticos mediante una selección más detallada y los lavan. Después los residuos ya limpios se transforman por lo general en granza comercializable de dos tipos:

- a. *Plástico genérico reciclado* que presenta cierta degradación, por lo cual se adiciona a materia prima virgen.
- b. *Plástico mezclado reciclado* que está formado por diversos tipos de resinas. Los plásticos mezclados (commingled) frecuentemente se destinan a aplicaciones finales de bajas prestaciones, como son las maderas plásticas que se usan en la producción de mobiliario de jardín y en la agricultura [BISIO95].

1.2.3.5 Tecnologías para la recuperación y el reciclaje de plásticos

1.2.3.5.a Recolección o Recogida

Son numerosos los métodos para la recolección de productos de plástico que entran al flujo de residuos municipales: contenedores comunitarios, recogida a pie de acera, centros de depósito, recogida selectiva y otros. Entre los que se mencionan, la recogida selectiva gana día a día más adeptos [BAESA96] [ALONS96].

Con la excepción de la recogida manual de plásticos, todas las alternativas de recolección demandan en mayor o menor medida de equipos especializados y sistemas de planificación y ejecución del trabajo. Es evidente que la mejor manera de realizar este trabajo es incorporarse a los sistemas municipales de gestión de residuos [LUND96].

Los gobiernos diseñan y operan dichos sistemas, que recolectan, seleccionan, y disponen para recuperación energética o vertedero a los residuos que se generan en sus áreas de responsabilidad.

1.2.3.5.b Selección de residuos de plástico

El mercado del reciclaje demanda materiales con grados de pureza aceptables para ser aprovechados convenientemente. Para lograr el mayor valor posible de los plásticos reciclados conviene maximizar su selección. Las tecnologías para separar los residuos de plástico de otros materiales se clasifican en cuatro y se explican a continuación :

a. Macroselección

Es la más sencilla de las tecnologías y consiste en tomar los productos de plástico y separarlo en sus diferentes componentes individuales. Esta operación puede hacerse en forma manual o automáticamente. En su forma más sencilla, esta tarea produce lotes de balas de residuos de plástico por tipo o forma (por ejemplo de película de plástico) que se obtienen manualmente. En el otro extremo de la técnica tenemos grupos de productos separados por tipo de plástico y por su apariencia, que se generan mediante equipo que usan chorros de aire o dispositivos mecánicos que apartan al plástico de otros materiales como vidrios o metales. Abajo se describen los tipos de equipo comunes en la industria [LARRA97]:

- Electromagneto para la separación de metales
- Sistemas de inducción eléctrica para la separación de latas de aluminio
- Sistema de chorros de aire para la separación de vidrio y plástico
- Sistema de separación por gravedad
- Trituradores de vidrio
- Compactadoras de balas
- Bandas transportadoras

La fácil identificación para los operadores de la macroselección ha sido un problema constante, que en buena medida se ha logrado gracias a la codificación de materiales plásticos ampliamente conocida en el medio.

Una técnica que aún se explora y que proviene de la industria automotriz, es que cada pieza de plástico porte un distintivo electrónico, que es sometido a un lector que ofrece toda la información sobre las características del material. El principal obstáculo para el desarrollo de este distintivo es el coste de su implementación [MURAK01].

b. Microselección

Es la separación de los residuos por tipos de plásticos. Para realizar el proceso de microselección, el plástico ha de ser triturado hasta obtener pequeños trozos entre 3 y 6 mm de diámetro. Para la microselección se aplica con éxito la tecnología de flotación, que consiste en aprovechar la diferencia de densidades que permite separar a los residuos por su comportamiento dentro de un contenedor de agua. Se ha experimentado en un pasado reciente con técnicas de flotación que usan diferentes sustancias como agua con alcohol y agua con sal en varias concentraciones y que permite separar plásticos como polietileno, poliestireno y PVC. Esta técnica hoy vuelve a tener atractivo para los recicladores.

Otra propuesta aún en proceso de evaluación es la microselección criogénica, que aprovecha las diferentes formas de fractura que tienen los plásticos según sus tipos a bajísimas temperaturas.

Se experimenta con otras técnicas de microselección que aprovechan las propiedades específicas de cada plástico como su grado de cristalinidad, sus diferencias moleculares y atómicas. Estas técnicas aún se encuentran en fase de evaluación, sin embargo sus reportes son prometedores y en especial llama la atención la propuesta del Centro

Tecnológico Gaiker, que consiste en la identificación a través de espectroscopia inducida por láser [LARRA97].

c. Selección molecular de componentes

Esta técnica es de especial interés en los materiales compuestos por varios tipos de plásticos y que son comunes en los embalajes. Estos ofrecen protección mecánica y en forma simultánea son una barrera para el oxígeno y la humedad.

La separación molecular selecciona polímeros mediante la disolución de todos éstos en una solución. Esto es, que se trata de aprovechar la temperatura de disolución diferente para cada polímero. La tecnología en cuestión puede llegar a tener gran importancia en la industria cuando se solucionen los aspectos de rentabilidad de la separación de materiales en sus familias.

Otra técnica de selección molecular es la despolimerización en su polímero original. Este proceso ya es propiamente una tecnología de reciclaje por sí misma. Su aplicación es de especial interés para residuos de PET y de Metilmetacrilato ya que son los materiales que mejor se prestan para su proceso. Consiste en la degradación térmica del polímero que ocurre a través de una reacción de radicales libres a una temperatura entre 300 y 400 °C. Los radicales libres entonces inician el rompimiento de las cadenas y su dispersión. La patente de despolimerización más conocida en la industria pertenece a la empresa Dupont [EHRIG92].

d. Manejo de mezclas de residuos de plásticos

En muchas ocasiones se encuentran en el flujo de residuos municipales lotes de plásticos contaminados con residuos de otros materiales o bien con mezclas de varios tipos de plásticos. En ambos casos puede resultar inviable su separación pero eso no significa que no se les pueda aprovechar, ya que posteriormente pueden usarse de diversas formas para superar sus propiedades disminuidas, con equipo primitivo convenientemente dispuesto. De una mezcla no seleccionada, sin limpiar y con contenidos de metal y papel, puede fabricarse un producto útil. Después, si el papel y el metal son retirados de los residuos de plástico, la mezcla no seleccionada puede mezclarse y fundirse con equipo convencional.

En resumen podemos decir que hay grandes posibilidades en la selección de materiales de plástico que provienen del flujo de residuos:

1. Obtener un material de calidad que compite por sus propiedades con la resina virgen. A éste se le llama "material genérico".
2. Cuando desde los puntos de vista técnico y económico no es posible la obtención de un genérico, la opción es obtener un "material mezclado". Estos materiales muestran un gran potencial para la industria, donde los principales retos se encuentran en lograr vencer la incompatibilidad de algunas resinas entre sí y lograr un comportamiento fiable y constante del lote de plásticos mezclados.

Una vez recolectados y seleccionados los plásticos procedentes del flujo de residuos están listos para entrar en el sistema de reciclaje. Si el fin de estos materiales es ser convertidos en objetos, la tecnología indicada será el reciclaje mecánico. Si lo que se propone es obtener productos químicos o combustibles de los residuos de plástico, se procederá al reciclaje químico o reciclaje terciario.

1.2.3.5.c Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico es un grupo de operaciones de carácter mecánico o físico a las que se someten los residuos de plásticos para recuperar el material que lo constituye. Es el modo tradicional de gestionar los residuos, recortes y restos (scrap) de termoplásticos obtenidos en las operaciones de transformación. En este último caso, el proceso se realiza normalmente en las instalaciones de la misma planta que los produce.

La tecnología que se aplica para el reciclaje mecánico exige la operación de las siguientes etapas:

1. Etapa de lavado y acondicionado

Son numerosos los procesos de lavado y acondicionado que se han desarrollado en el área de envases y embalajes, sin embargo, con algunas variaciones pequeñas, todos guardan el siguiente orden [BISIO95]. Se han omitido las etapas de recolección y selección las cuales se han descrito con anterioridad:

- a. Triturado de los residuos de plástico. El polímero es sometido a un chorro de aire a presión lo que permite separarlo de contaminantes como polvos, vidrio, papel, etc. El plástico pasa al proceso de lavado.
- b. Los trozos de plástico reciben un baño de agua fría para después pasar a otro baño, éste de agua caliente con detergente.
- c. El detergente es retirado a través de un baño y el agua es filtrada y usada nuevamente.
- d. El lote de material es enjuagado y conducido a hidrociclones o a tanques de flotación. Si se trata de materiales mezclados, esta etapa permite separar materiales “pesados” o contaminados (como sobrantes de aluminio y adhesivos) de los plásticos “ligeros” y limpios (como el polietileno o el polipropileno). Si es un material genérico, la etapa puede evitarse.
- e. Los componentes “ligeros y pesados” (si es el caso) son separados y secados en forma natural o a través de chorros de aire caliente u hornos.
- f. Finalmente los plásticos limpios son envasados generalmente en sacos para ser conducidos a la siguiente etapa de su reciclaje. En algunos casos el reciclador aplica un detector de metales al material que sale del proceso y así evita que algún contaminante metálico pueda dañar el equipo de transformación.

2. Etapa de granulado

- g. Molienda. El plástico triturado que proviene del lavado se somete a una nueva molienda con el fin de homogenizar el tamaño de las hojuelas y adecuarlas de la mejor manera a los procesos posteriores.
- h. El material es extruido y granulado. Los materiales reciclados ofrecen la posibilidad de granularse con cortadores frente al cabezal o bien en cordones, que evita problemas con la viscosidad variable del material, pero éste último obliga a un proceso de corte posterior. [SHALL98].

- i. El material reciclado es envasado en sacos y enviado a almacén. Después puede ser conformado por cualquiera de los procesos convencionales como extrusión, calandrado, inyección, soplado, etc.

1.2.3.5.d Reciclaje químico

No obstante su aparente practicidad, el reciclaje mecánico enfrenta dificultades para ser considerado una opción de éxito pleno. En opinión de especialistas, el reciclaje mecánico puede considerarse un tratamiento intermedio de residuos, pues tarde o temprano, será necesario eliminarlos mediante otros procedimientos [SERRA01]. Este hecho ha promovido el desarrollo con éxito de las tecnologías de reciclaje químico donde los residuos de plásticos son forzados a sus constituyentes químicos de origen, lo que permite posteriormente ser usados para formar materiales nuevamente vírgenes.

Las ventajas del reciclaje químico son claras [MAYNE02]:

- Permite el reciclaje de mezclas de plásticos
- Produce materiales de altas especificaciones
- Los mercados son receptivos en lo general a estos materiales
- Muestran potencial para el desarrollo de grandes empresas

El reciclaje químico atiende a los residuos de plástico con técnicas particulares dependiendo de la naturaleza del material, esto es según se trate de un polímero de condensación o de adición. Para los polímeros de condensación, la despolimerización química convierte al material a reciclar en sus monómeros de partida y que se aplican después en la formación de plásticos vírgenes. Esta técnica se utiliza en el reciclaje de envases de PET (polietilentereftalato). A través de procesos de Hidrólisis, Glicólisis y Metanólisis a temperaturas entre 25 y 30 °C y presión moderada (1-40 bares) el material en cuestión puede llevarse hasta sus monómeros constituyentes [MILGR92].

Para los materiales polimerizados por adición (LDPE, HDPE, PP y otros) no es viable la degradación del material a reciclar a sus monómeros constituyentes por ninguno de los procesos actuales de reciclaje químico [SERRA01]. Sin embargo estos autores señalan que para el caso del poliestireno se puede reciclar por craqueo térmico. El craqueo térmico busca forzar el residuo plástico en materias primas elementales como gas de síntesis, hidrocarburos u otros combustibles.

Una posible vía de tratamiento es la de incorporar de forma directa a los residuos de plástico en las corrientes de un refinera. Esta propuesta ha gozado de poca aceptación debido principalmente a que se demanda lograr una mezcla homogénea de corrientes dentro de la refinera, así como de tratamientos previos para refinar elementos químicos indeseados, como el cloro presente en el PVC y que a bajas temperaturas forma HCl, compuesto altamente corrosivo.

La clasificación de los principales tratamientos de reciclaje químico son [SERRA01]:

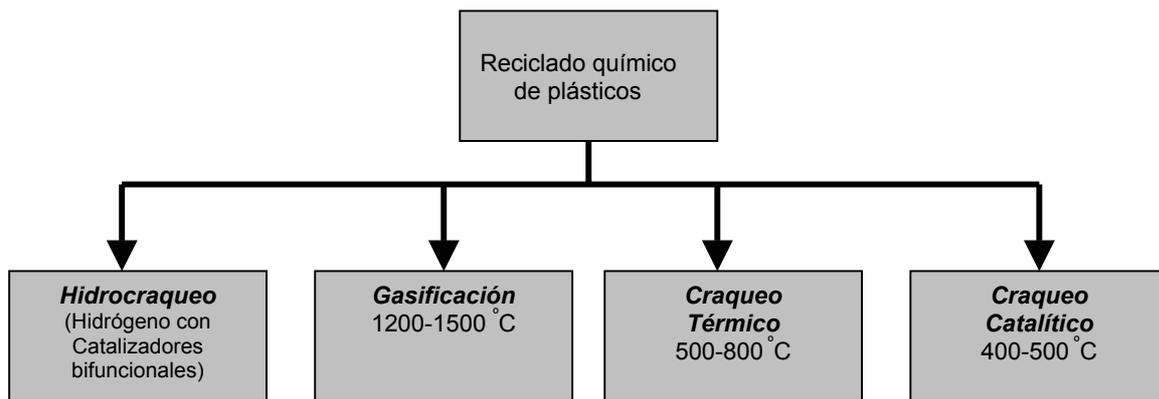


Figura 1.5 Procesos de reciclaje químico para polímeros de adición
Fuente: Serrano.D. et. al. (2001) *Reciclado químico de plásticos* p.157. Adaptación.

a. El hidrocraqueo

Opera en presencia de hidrógeno y de presiones cercanas a los 100 bares con temperaturas del orden de 400 a 500°C con catalizadores bifuncionales. Es un proceso versátil y que funciona de forma satisfactoria con residuos de plásticos mezclados o contaminados, siendo esto un atractivo de la técnica. Además algunos elementos como el cloro, el nitrógeno y el azufre no le plantean inconvenientes serios. El sistema demanda el manejo con hidrógeno a altas presiones, lo que es tanto costoso como peligroso. No obstante sus atractivos, el hidrocraqueo no ha cumplido con las expectativas económicas con las que nació [BRAND96].

b. La gasificación

La gasificación permite obtener gas de síntesis de los residuos de plástico, materia prima para la fabricación de metanol.

El proceso consta de dos etapas: primero la licuefacción de los plásticos mediante craqueo térmico moderado que genera aceite pesado que se lleva a un lecho de arena; en la segunda etapa se gasifica el aceite con oxígeno y vapor de agua a una temperatura entre 1200 y 1500 °C. Este procedimiento produce solamente gas de síntesis, escoria, metales y sales, por lo que tiene que acoplarse a otras instalaciones que permitan su acondicionamiento en forma de metanol, amoníaco o se produzca electricidad. Una gran ventaja de esta técnica es que acepta cualquier tipo de residuo plástico. Serrano [2001] y Mayne [2002] mencionan que empresas de gran importancia como Texaco se han inclinado abiertamente por este proceso de reciclaje.

c. El craqueo térmico

Es la rotura de las largas cadenas de los polímeros en cadenas más cortas dentro de atmósferas inertes a temperaturas que oscilan entre los 500 y 800 °C. El producto del craqueo térmico debe favorecer su procesado en equipo industrial existente. Con polímeros de adición se obtiene una amplia distribución de productos debido al mecanismo radicalario de la pirólisis térmica. El proceso se ha llevado a una gran variedad de diseños de plantas para craqueo térmico que manejan instalaciones con extrusoras, hornos rotatorios, lechos fijos o lechos fluidizados. Este último es el más

utilizado (como por ejemplo en la British Petroleum, Grangemouth. UK) ya que permite una eficaz transmisión de calor [BRAND96].

d. El craqueo catalítico

En este proceso el rompimiento de cadenas largas se logra adicionando un catalizador, usualmente un sólido con propiedades ácidas (zeolitas, sílice-aluminas) [SERRA01]. Este tipo de craqueo muestra ventajas sobre el craqueo térmico. Permite trabajar a menor temperatura ya que se desarrolla con mayor velocidad. Por otro lado y muy importante, es posible controlar la distribución de productos de salida orientando la producción hacia materiales de mayor valor como los naftenos o los aromáticos. Sin embargo, el uso de catalizadores presenta problemas de operación en el proceso: su posible desactivación debido a la presencia de contaminantes que se pueden presentar en los residuos de plástico. Estos contaminantes pueden ser cloro o metales diversos. Otro problema puede ser la elevada viscosidad de los polímeros. Empresas usuarias de este proceso como Fuji Recycle y Mobil Oil Co. solucionan actualmente el problema mediante una etapa previa de craqueo térmico del material a reciclar.

Previa a su alimentación, los residuos a reciclar son triturados y lavados. Después por flotación son separados el PET y el PVC. La mezcla que resulta se alimenta a un sistema de craqueo térmico previo calentamiento a 250 °C. Los gases que resultan se llevan a un reactor catalítico para su reformado. Los productos que resultan del sistema son líquidos 80% (50% gasolina, 25% queroseno y 25% petróleo), 15% gases y un 5% de residuos finales [SERRA01].

1.2.3.6 Los procesos de recuperación y reciclaje de espumas de EPS

El material expandido a ser reciclado tiene tres orígenes:

- **Recortes**

Son materiales que se generan dentro de las mismas empresas fabricantes de materia prima como es el caso de las perlas expandidas. Aquí también se encuentran los sobrantes de producción de los moldeadores de EPS. En ambos casos son reciclados en el lugar de su generación.

- **Grandes consumidores de EPS**

Son empresas industriales, comerciales o constructoras que por la naturaleza de sus actividades consumen cantidades importantes de EPS. Es práctica común que esas organizaciones concentren los residuos para después entregarlos a un reciclador. Hay casos, como el de las empresas electrónicas o automotrices, que el volumen de EPS que se maneja es tal que se ven obligadas a prensar o triturar la espuma. En otras situaciones esta operación puede ser responsabilidad del reciclador [WASTE03, HORNB01]. Esta forma de concentración de EPS para el reciclaje se practica desde tiempo atrás en países como Alemania, Inglaterra, Australia y Japón. En forma más reciente en los Estados Unidos de América y en países como Corea y Filipinas [INTER03].

Impulsado por la ANAPE en España se ha desarrollado el proyecto ECO EPS que busca un aumento significativo de la tasa de reciclado del EPS en el país. Dentro de este proyecto figuran los centros ECO EPS que son empresas recicladoras que también dan servicio de acopio y transporte de los residuos desde el lugar donde estos se originan. Hoy día hay tres centros de ECO EPS en España. Uno en Barcelona

(Brafim Mecplast), otro en Madrid (Formas Recicladas, S.L) y el último en Mallorca (Axa Universa). Otros dos centros se encuentran en proceso de constitución y se ubicarán en las ciudades de Zaragoza y Valencia [ANAPE04].

- **EPS que proviene del flujo de residuos municipales**

Aquí se concentran todos los residuos de EPS que provienen de usos domésticos y de comercios.

1.2.3.6.a Operaciones previas al reciclaje de EPS

Los residuos de espuma de EPS antes de pasar al proceso de reciclaje, se someten primero por un control de selección y proceso de lavado que se describen a continuación:

- **Selección**

Cuando el EPS arriba a la planta de reciclaje generalmente ya llega con una primera selección y que se da en el lugar de concentración de grandes consumidores. Una segunda selección divide en espumas “limpias” y “sucias”. Las espumas “sucias” o contaminadas pueden tener restos de alimentos, grasa, pescados, plantas, frutas o vegetales, papeles adheridos, grapas, cinta adhesiva o bien presentar restos de impresión. Ambos casos de residuos de EPS, los limpios y los contaminados pueden ser reciclados, pero los procesos son diferentes y es de suma importancia que se manejen por separado.

- **Lavado**

Antes de que el EPS “sucio” sea reprocesado debe ser limpiado de contaminantes, lo que generalmente se realiza en tanques de lavado que contienen agua y detergentes. Hay poca información acerca de procesos de lavado específicos para EPS. Esto lo atribuimos a que los recicladores prefieren disponer el material sucio para su recuperación energética que someterlo a un proceso de limpieza intenso. Hornberger [2001] señala que una técnica de lavado ha sido desarrollada por Utah State University y la empresa The Recycling Professionals, Inc. Primero la espuma es cortada en trozos grandes de manera que se puedan manejar en una banda en movimiento, después la espuma sucia es enjuagada y flotada en una tina. Los restos de alimentos, papeles y otros contaminantes se depositan al fondo de la tina. La espuma viaja flotando a los sistemas de limpieza donde se lava para retirar grasas y demás sustancias indeseables. Finalmente el EPS ya limpio es densificado, triturado y extruído en granza.

Cuando la espuma ha sido seleccionada y lavada de así requerirse, está lista para su reciclaje. El reciclaje mecánico del EPS se agrupa en cuatro bloques según sus procesos y aplicaciones:

1.2.3.6.b Triturado de EPS para la fabricación de nuevos moldeados

Los residuos pueden triturarse para ser incorporados a la fabricación de nuevas piezas con forma de bloques o geometrías específicas. El material que resulta del triturado generalmente se dirige a la fabricación de bloques. Respecto al porcentaje de participación del EPS triturado en un nuevo producto no hay acuerdo entre los especialistas. Algunos autores como Lindhof

[BRAND96], señalan que su mezcla con material virgen debe hacerse en forma muy limitada y atendiendo los fines de uso del nuevo producto. El mismo autor ubica estos porcentajes en no más del 15% para la fabricación de bloques y 5% para formas específicas y en estas últimas dependiendo de sus grosores de pared. Mackey y otros [EHRIG92] estiman que toda aplicación puede manejarse con un mínimo del 10% de material reciclado sin problemas de procesamiento posteriores. Fabricantes como KBM de Dinamarca prepara sus máquinas mezcladoras de materiales reciclados y vírgenes que produzcan mezclas con una relación de 5 ó 10 ó 15% del total, aunque permite si así se decide que este rango vaya hasta el 95% de material reciclado [KBM03].

Se ofrecen en el mercado de maquinaria para el reciclaje de residuos de EPS dos tipos de sistemas:

1. Sistemas de trituración y molienda. Permiten la trituración de la espuma a un tamaño determinado y la eliminación de polvo de EPS. Está formado por:
 - Triturador. Generalmente de cinceles que cortan en piezas gruesas al residuo
 - Molino. Las piezas gruesas del triturado son llevadas a partículas más pequeñas
 - Tamiz
 - Colector y envasador

En España el único fabricante de este tipo de maquinaria es la empresa Enginy S.A. que ofrece equipos con un máximo de producción de 12 m³/h.

2. Sistemas de triturado y/o compactación. Son sistemas que ofrecen triturar el material también con un sistema de cinceles para producir residuos gruesos y depositarlos después en bolsas.

Las mismas máquinas trituradoras pueden ser acondicionadas para compactar el material entre 30 y 50 veces. El resultado son tramos de EPS prensado con medidas aproximadas de 20 x 20 x 60 cm [KBM03]. Estos tipos de máquinas funcionan con éxito en los patios de los grandes consumidores que así logran manejar sus residuos en espacios menores.

1.2.3.6.c Triturado de EPS para mejora de suelos y producción de composta

El agregar residuos triturados de EPS reciclado a los campos de cultivo es una práctica que se da en la agricultura intensiva desde los años sesenta. Sus fines son mejorar la circulación de aire y agua en el macizo de tierra. También busca evitar que se compacte el suelo de cultivo.

Los agregados de residuo triturado de EPS reciclado participan en la producción de composta. Las ventajas que tiene la aditivación de composta con residuos de EPS son: mejora la aireación, disminuye la compactación de la tierra, coopera a disminuir los lixiviados y fomenta el desarrollo de organismos anaerobios [ANAPE03].

Para usar residuos de EPS se recomienda que estos estén triturados hasta lograr tamaños de partículas entre 6 y 12 mm de diámetro. De acuerdo a la humedad de la pila de compostaje, la mezcla recomendada en porcentaje es entre 15 y 25% en volumen [BRAND96].

El Styromull® (marca registrada de BASF) es un auxiliar comercial de suelos que está formado por perlas preformadas y recicladas de EPS trituradas hasta lograr características de tamaño bien definidas entre 1 y 30 mm de diámetro [AGRIF03]. Brandrup opina que este material no es un “residuo” como tal ya que su preparación demanda una cuidadosa selección del reciclado de EPS [BASF03].

Algunas aplicaciones del Styromull® y de otros auxiliares para suelos provenientes del reciclado del EPS son:

- La preparación de tierras para jardines, hortalizas, plantaciones de vid
- Arquitectura del paisaje
- Acondicionado de pistas deportivas
- Rellenos de obra civil para favorecer el drenaje
- Preparación de sustratos para cultivos intensivos y de invernadero

1.2.3.6.d El EPS reciclado de aplicación en la construcción

Otra aplicación del EPS reciclado se da en los materiales para la construcción. El residuo de EPS es triturado, molido y seleccionado por tamaño de partícula, para después ser mezclado con aglutinantes comunes en la industria como el barro y el cemento. Las mezclas resultantes se usan en la fabricación de paneles estructurales premoldeados, bloques y ladrillos aligerados e inclusive sistemas que permiten construir casas completas basadas en paneles y otros elementos arquitectónicos que ofrecen una construcción más fácil y económica, ligera y con un magnífico desempeño de aislamiento térmico, como es el caso QUAD-LOCK® [EPSAS 03] [OIKOS03].

También masas húmedas de mortero y reciclado de EPS pueden aplicarse en estructuras ya existentes, lo que resulta en recubrimientos con diversos grados de respuesta al calor, al ruido, al fuego y de resistencia a esfuerzos mecánicos.

En las aplicaciones descritas antes, los residuos triturados y molidos de EPS actúan como estructuras porosas o formadoras de poros en una matriz mineral. Los productos que aprovechan estas mezclas requieren cumplir con demandas técnicas precisas de la industria de la construcción, por lo cual es de gran importancia atender el triturado de EPS, la selección del tamaño de partícula que resulta y la proporción que debe guardar en la mezcla. En el caso de ladrillos extruídos, alrededor de 1/3 del volumen de la pieza lo ocupan partículas de EPS que van de 1 a 4 mm de diámetro. La porosidad que se genera en el ladrillo incrementa su desempeño térmico y reduce el peso del elemento.

La masilla para recubrimiento es una mezcla de tierras y partículas de EPS reciclado seleccionadas según el tipo de trabajo a realizar (usualmente entre 1 y 4 mm de diámetro). A la mezcla de tierras y EPS se le agregan aglutinantes minerales como cemento o cal y otros aditivos. Después la masilla se puede aplicar manualmente o por aspersión en muros y techos. El espesor de esta capa va de 3 a 6 cm y requiere de una última capa de acabado convencional. Las masillas de EPS son apreciadas debido a sus aportaciones como aislante térmico, pero sobre todo por su baja tendencia a crear grietas en los acabados.

La aplicación del EPS y sus reciclados en la construcción representa una gran oportunidad para eficientar el uso de la energía en edificios, ya que el aislamiento térmico de la construcción aumenta considerablemente, lo que permite disminuir el gasto energético para

climatizarlo. Estudios realizados por un organismo independiente han dado como conclusión que la efectividad energética de un edificio muestra mejoras de hasta un 35% sobre edificios similares donde no se emplearon materiales con contenidos de EPS [ESPES02]. Por otro lado el uso de elementos aligerados con residuos de EPS o de otros plásticos permiten el adelgazamiento de partes estructurales del edificio, lo que lleva a un ahorro de materiales tradicionales como acero y hormigón.

1.2.3.6.e Reciclaje de EPS en granza

Es la forma más común de reciclaje de EPS. Los residuos una vez triturados y compactados son conducidos a máquinas extrusoras que generan granza de poliestireno compacto. Esta nueva materia prima se acondiciona y se mezcla con poliestireno virgen en proporciones varias, según el nuevo producto a fabricar como son bolígrafos, cajas de discos compactos, perchas, material de oficina y muchos otros objetos.

Una práctica novedosa para el EPS reciclado es como sustituto de madera (plastic lumber), que se aplica en gran cantidad de usos como mobiliario para exteriores, vallas y elementos de jardín, elementos decorativos domésticos, etc. El EPS reciclado guarda una gran similitud con la madera y que inclusive puede ser mecanizado de la misma manera. Generalmente este material es muy económico en comparación con la madera maciza en aplicaciones similares. El sustituto de madera hecho de residuos de EPS resulta de triturados de espuma, cargas y aditivos, como son fibra de vidrio, fibras naturales, polvo de ladrillo, talco, pigmentos y retardantes de degradación por rayos UV.

A continuación se describe el proceso de la obtención de granza de residuos de EPS:

Como todos los termoplásticos, el EPS funde cuando es expuesto al calor y se convierte en poliestireno sólido; esto se debe a la expulsión de gas que acompaña a la destrucción de las celdillas. Los procesos térmicos para el reciclaje de plásticos implican un riesgo a las propiedades del polímero, ya que su utilización incorrecta degradará las características del material. La aplicación exitosa de las técnicas de reciclaje de plásticos que manejan calor, requiere un manejo adecuado de temperatura de proceso, del tiempo en que el material permanece dentro de zonas calientes de la máquina y la fricción a la que es sometido el polímero [GONZA01] [BRAND96].

Cuando el material de EPS a reciclar ha sido seleccionado y de requerirse lavado y secado, se encuentra listo para ser transformado en granza.

Para disminuir los costes que implica el manejo y transporte del residuo de EPS, los grandes usuarios o el reciclador lo compactan en el mismo sitio de recogida hasta lograr disminuir su volumen en una relación que va de 40 a 50:1, lo que lleva a nuevas dimensiones al residuo.

Otras formas de manejo de los residuos de EPS para su granceado son la trituración y el corte con alambre.

La trituración es una práctica usual en la industria y el equipo para ello puede encontrarse acoplado a líneas de densificación, extrusión y granceado. Máquinas de este tipo se pueden encontrar en las bodegas de los grandes usuarios de embalaje de EPS que encuentran una manera atractiva para el manejo de sus residuos. También hay trituradoras en las empresas de reciclaje y acondicionado donde los residuos son molidos hasta cumplir con determinada granulometría, para después ser mezclada con materia prima virgen y ser aprovechados en otros productos de EPS. (Nuova-idropress, Inc).

Una opción novedosa de manejo de reciclados de EPS es el corte de residuos con alambre para su posterior aprovechamiento. El sistema AXIA CubePro® permite obtener pequeños

cuerpos geométricos de EPS, que pueden ser usados directamente como material de embalaje (loose fill) o ser transformados en granza. El sistema consiste en una máquina alimentada de residuos de EPS que son forzados a pasar a través de una retícula de alambres calientes, que con su separación determina el tamaño de las pequeñas piezas de EPS y que por gravedad son depositadas en costales.

La oferta de compactadoras para espumas de plástico ofrece una amplia variedad de capacidades, las más pequeñas con una producción de 70 kg/h hasta grandes instalaciones que compactan 1000 kg/h. Las densidades que producen estas máquinas son 270 kg/m^3 en la primera y entre 350 y 430 kg/m^3 para la instalación mayor [RUNI03]. Estos sistemas ofrecen como producto de salida bloques de compactado, con dimensiones aproximadas de $20 \times 20 \times 60$ cm y con un rango de pesos según el equipo usado entre 30 y 50 kg.

La compactación muestra una gran ventaja con respecto a la densificación. Al utilizar solamente presión para colapsar la estructura del EPS, evita que el material sea expuesto a altas temperaturas. La compactación logra conservar las propiedades del polímero ya que su degradación es mínima y disminuye las emisiones de gases del sistema hacia el medioambiente.

Los equipos de densificación tienen como fin colapsar la estructura celular de la espuma mediante la aplicación de calor. Es común que estas máquinas sean ya parte de las líneas de extrusión-granceado.

Las densificadoras son de varios tipos:

- Productoras de trocería de poliestireno reciclado

En estos sistemas el material es triturado y depositado en una cámara de calor. El poliestireno fluidizado se deposita en moldes dentro de la misma máquina y es enfriado para después ser conducido a una máquina extrusora. Ehrig [1992] señala que la degradación en este proceso representa un 40% de su peso molecular. Otros equipos incorporados a las productoras de trocería alimentan directamente a una extrusora-granceadora (Repro Machines Ind., Sentinel).

- Densificadoras de rayos infrarrojos

La alimentación de estos equipos se hace con grandes trozos de EPS a reciclar los cuales son conducidos por una banda transportadora hasta una cámara de calor, el cual es producido por una fuente de rayos infrarrojos y así no hay flama involucrada. El plástico densificado es posteriormente extruído y granceado. Aunque estas máquinas muestran mayor eficiencia en el uso de la energía, algunos tipos de espumado resultan con notoria degradación en sus propiedades, por lo cual su aplicación tiene que ser evaluada según el fin que se pretenda para el material obtenido (AP- Shrinker).

- Densificadora de disco rotatorio

El residuo de EPS es triturado y alimentado al sistema. El material es sintetizado por el calor que resulta de la fricción producida por la rotación de un disco que gira contra otro fijo. El control de la temperatura se da aumentando o disminuyendo la distancia entre los discos. El plástico ya densificado es forzado a través de un filtro que determina su tamaño. (Buss-Condux Inc.).

Una propuesta tecnológica de notable interés para la densificación de espumas termoplásticas, la hace la Oficina de Tecnologías Industriales, Eficiencia Energética y Energía Renovable del Gobierno de los Estados Unidos de América a través de un proyecto compartido con Hudnut

Industries, Inc. Al proceso de densificación se le designa como Recyclotron™ y consiste en un sistema que recibe espuma troceada la cual es dirigida a una cámara de reacción donde un flujo de aire caliente soporta al plástico. Al densificarse el material no se sostiene más en flotación y cae. Una banda en la base de la cámara recoge plástico encogido que puede ser usado directamente en nuevos moldeos o bien someterse a acondicionamiento. La empresa asegura que la disolución de gases provenientes de la densificación en el flujo de aire caliente, permite mantener el proceso abajo de los límites de seguridad marcados por la norma norteamericana.

Muchos fabricantes ofrecen maquinaria para transformar directamente el residuo de espuma en granza sin una densificación previa. El material a reciclar se recibe en una trituradora que alimenta a presión la cámara caliente del husillo en la extrusora y después a la cortadora de granza. Un aspecto que demanda la atención del reciclador es el hecho que estas máquinas requieren ser ventiladas para dar salida a los gases atrapados en el material a reciclar. Cuando el equipo no cuenta con sistemas de salida de gases, su producción disminuye debido a que la alimentación debe hacerse de forma más lenta y así disminuir las presiones internas en el cañón [BRAND96] [EHRIG92].

Algunas consideraciones al respecto del reciclado en granza:

- Toda sustancia ajena a la espuma tiene que ser removida en su totalidad antes de ser sometida al calor, de lo contrario el material reciclado resultará contaminado y su remoción será difícil.
- En mayor o menor medida, el procedimiento de reciclaje mecánico trae consigo la pérdida de propiedades originales de la resina.
- La inversión y mantenimiento en una planta de granceado de residuos de EPS puede ser alta.
- Es difícil mantener una calidad constante en el producto del reciclaje, en especial si el control sobre sus orígenes no es riguroso.
- El EPS rechazado y la espuma combinada con otros plásticos, así como las espumas provenientes de la construcción también pueden ser aprovechadas como materia prima para el reciclaje químico.

1.2.3.6.f Reciclaje de EPS por solventes

Esta técnica novedosa aún es motivo de controversia por su viabilidad económica. El reciclaje por solventes no es una reacción química sino un cambio físico que reduce el volumen de los residuos hasta relaciones cercanas al 1 a 100. Requiere el uso de un solvente patentado (Ecomelts Co. Ltd) [2003]. Esta sustancia transforma el EPS en un gel no adhesivo de poliestireno de gran pureza sin afectar en absoluto otros materiales o a otros plásticos. Después del proceso, el solvente es recuperado por centrifugación para acondicionarlo y reiniciar el ciclo. El gel de poliestireno que resulta se puede usar directamente como materia prima para fabricar otros productos, ser transformada en granza de poliestireno o ser usada como combustible. La empresa que comercializa el solvente también ofrece máquinas para la transformación de residuos de EPS. Su oferta industrial va desde sistemas dirigidos a pequeños transformadores hasta equipos de gran capacidad.

1.2.3.6.g Recuperación energética de los residuos de EPS

La recuperación energética también es conocida como “proceso cuaternario de reciclado de materiales plásticos”, aunque se considera que no es un “reciclaje” propiamente dicho sino que es en efecto una “recuperación de la energía” contenida en el petróleo que se usó para la fabricación del EPS [EHRIG92]. Es obtener energía en forma de calor a partir de la combustión de los residuos de materiales plásticos. La recuperación energética resulta de gran interés cuando los residuos por una o por otra razón, no resultan atractivos para ser integrados al flujo industrial. Estos son los casos de las espumas sucias o impregnadas de contaminantes como restos de alimentos, tintas de impresión, fertilizantes, fungicidas, etc.

Cuando se realiza la combustión de EPS en incineradoras de recuperación energética no se producen gases dañinos, sus emisiones son controladas y filtradas. En esas instalaciones el EPS libera la mayor parte de la energía que contiene en forma de calor y coopera a la incineración de otros residuos (1 kg de EPS equivale en energía a 1,3 litros de combustible para calefacción).

Las emisiones reportadas durante la incineración del EPS son únicamente dióxido de carbono, vapor de agua y trazas de cenizas no tóxicas. El EPS además no contiene ningún gas de la familia de los CFC's [ANAPE03] [TORRES02].

Si bien la incineración de EPS se muestra como una opción aceptable desde la perspectiva medioambiental, otras opiniones expresan lo contrario, el quemar poliestireno “...supone la formación de sustancias como estireno e hidrocarburos aromáticos policíclicos y, si están presentes pirorretardantes bromados, se liberan cloruro de hidrógeno y dioxinas; el carcinógeno óxido de estireno se libera durante el proceso...” (Greenpeace) [WYTZE99].

La discusión entre las voces a favor y en contra de la incineración de los plásticos en general no muestras de darse por terminada. Es necesaria una correcta incineración para no producir emisiones tóxicas.

1.2.3.6.h El vertido de residuos de EPS

El vertido es la forma de gestión menos deseable para los residuos de EPS y debiese aplicarse como último recurso, ya que ello lleva implícito la pérdida de recursos. Cuando no hay otra salida para los residuos de EPS, el vertido de éstos puede hacerse de forma segura para el medioambiente. El EPS es biológicamente inerte, estable y no tóxico. Además no contribuye a la formación de metano (efecto invernadero) ni supone un riesgo para las aguas del subsuelo [ANAPE03] [BRAND96].

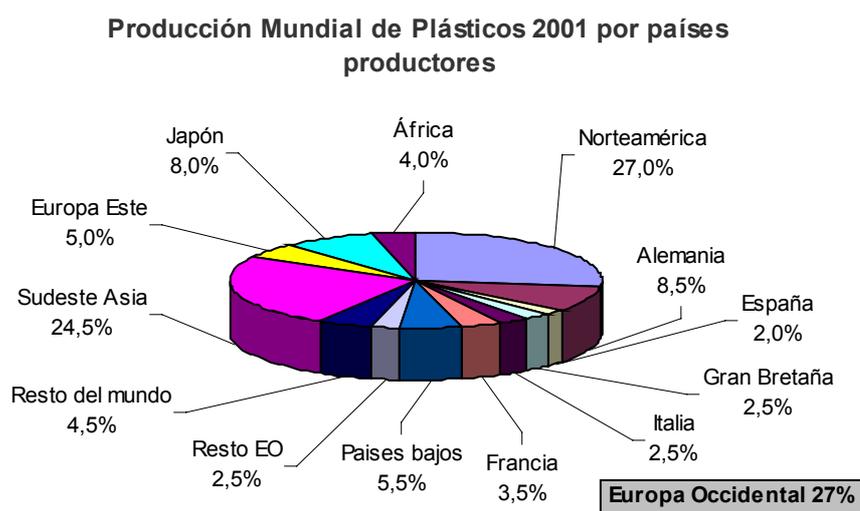
1.2.4 DATOS DE PRODUCCIÓN, CONSUMO Y RECICLAJE DE LOS PLÁSTICOS

1.2.4.1 Los plásticos en el mundo

1.2.4.1.a Producción mundial de plásticos

Desde su aparición como materiales industriales, tanto la producción como el consumo de plásticos ha crecido de forma sostenida, a excepción de ciclos que corresponden con hechos puntuales, como fue la crisis petrolera de los años setenta [TAMAM03] y la guerra de Irak en el 2002. En fechas recientes esta tendencia al crecimiento se ha confirmado [AMPE02].

La producción mundial de plásticos para el año 2001 se concentra en tres grandes bloques de productores. Norteamérica y Europa Occidental dominan con el 27% de la producción mundial cada uno, Sudeste de Asia con el 24,5% y el resto se distribuye en las diferentes áreas geográficas del mundo (ver gráfica 1.1). La producción mundial de plásticos declarada por el APME [2005] para el año 2003 fue de 169 millones de toneladas.

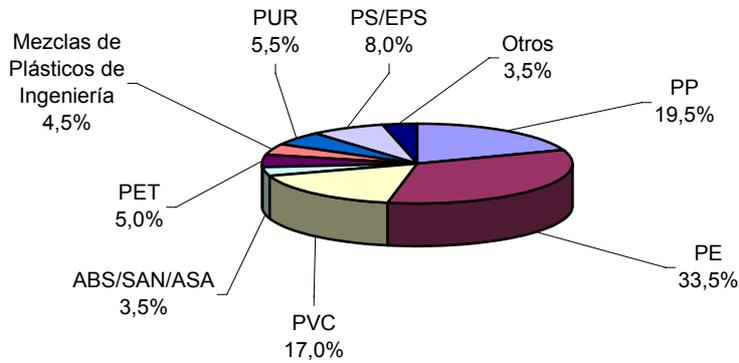


Gráfica 1.1 Producción Mundial de Plásticos distribuido por países productores, 2001

Fuente: BASF. Sartorius, I. (sep02) Development of plastics Manufacturing in Europe. Trieste: ICS-UNIDO.

En la producción mundial por tipo de plásticos, las poliolefinas mantuvieron su hegemonía sobre otras resinas con un porcentaje total del 53%, seguidas de lejos por el PVC con 17%. La producción de poliestireno (PS) y del poliestireno expandido (EPS) participaron con un 8,5%.

Producción mundial por tipo de plástico 2001



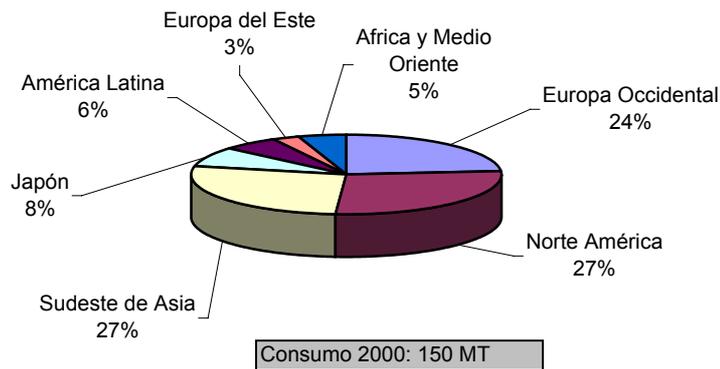
Gráfica 1.2 Producción Mundial de Plásticos por tipo de plástico, 2001

Fuente: BASF. Sartorius, I. (sep02) Development of plastics Manufacturing in Europe.Triestre: ICS-UNIDO.

1.2.4.1.b Consumo mundial de plásticos.

El consumo mundial de plásticos reportado para el año 2000 fue de 150 millones de toneladas, sin incluir las aplicaciones no plásticas. Este consumo asciende a 169 millones de toneladas para el año 2003. Las áreas geográficas donde se concentra el consumo a nivel mundial, no varía mucho de sus zonas de producción. Los grandes consumidores de plástico fueron Norteamérica con un 27%, Sudeste de Asia con 27%, Europa Occidental con 24% y el resto del consumo mundial se distribuye entre las otras áreas restantes (ver gráfica 1.3).

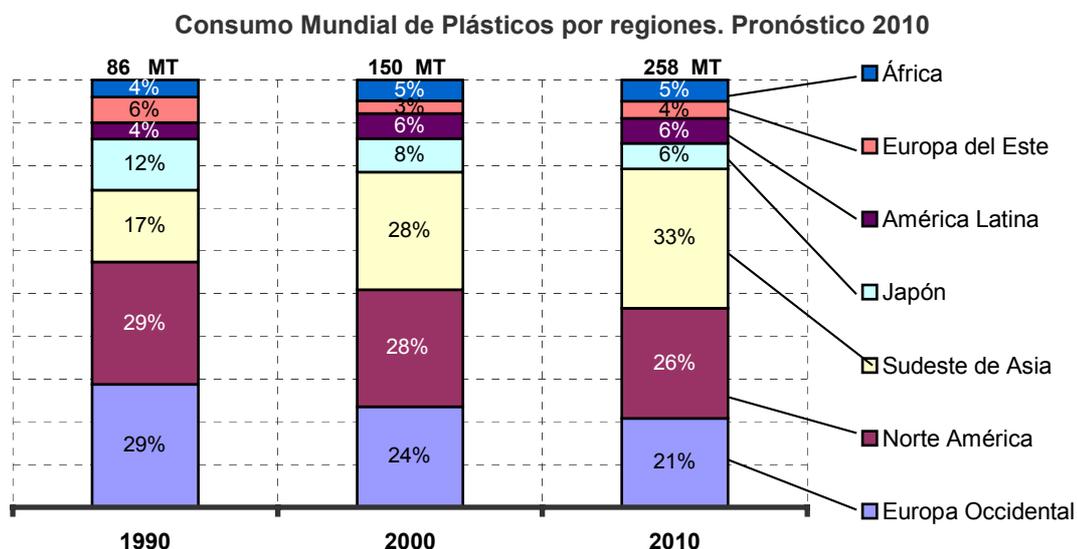
Consumo de Materiales Plásticos 2000 por regiones del mundo en porcentaje



Gráfica 1.3 Consumo de Materiales Plásticos por regiones consumidoras en el mundo, 2000

Fuente: Datos proporcionados por la BASF AG.

Los pronósticos de crecimiento de consumo de plásticos ofrecido por la BASF para el año 2010 (258 millones de toneladas), comparado contra el dato de consumo del año 2000, muestra una clara tendencia del mercado del Sudeste de Asia hacia su crecimiento, con el 33% del total del consumo del mundo. En el caso de Europa Occidental, se calcula que el consumo para el año 2010 roce los 53 millones de toneladas, con un 21% del total del mercado mundial. La región de Norte América consumiría el 26%. Estas tres últimas regiones seguirían siendo las grandes consumidoras del total de plásticos producidos en todo el mundo (ver gráfica 1.4).



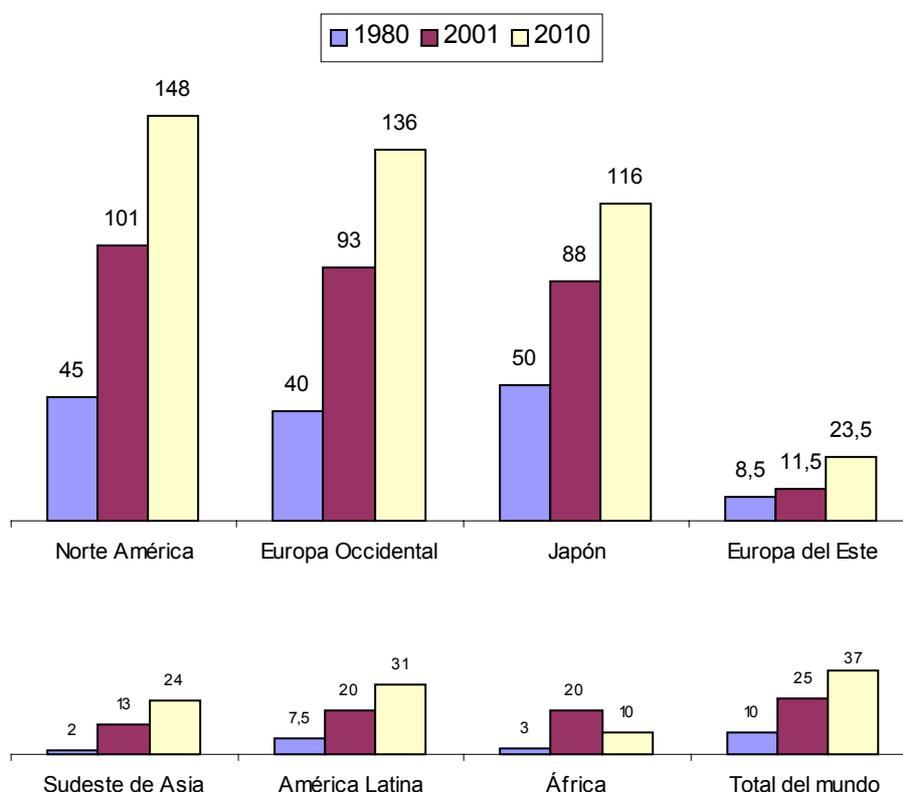
Gráfica 1.4 Consumo de Materiales Plásticos. Pronósticos de crecimiento para el año 2010 por regiones consumidoras, sin aplicaciones no plásticas. Fuente: BASF AG

Con respecto al consumo per capita en kg de plástico en el mundo, se observa un incremento promedio en el año 2001 equivalente al 150% con relación al consumo mostrado en 1980. El pronóstico de consumo per capita para el 2010 es de 48% más que el consumo declarado en el año 2001. De acuerdo a los promedios mundiales, el consumo de plástico por habitante del mundo fue de 10 kg para el año 1980, el consumo para el año 2001 se ha elevado a 25 kg per capita y el pronóstico para el año 2010 se fija en 37 kg por habitante del planeta, lo que significa un incremento en el consumo de plásticos de 3,7 veces en tres décadas.

La gráfica 1.5 indica que de acuerdo a los consumos de plástico por zonas geográficas del mundo, el mayor consumo per capita se dio en Norte América con 101 kg en el año 2001. Se espera que este consumo alcance para el año 2010 la cifra de 148 kg por habitante, que lo mantiene como el consumidor más intenso de plásticos en el mundo, seguido por los habitantes de Europa Occidental, con un pronóstico de 136 kg per capita para el mismo año.

De manera general se observa que el consumo de plásticos per capita en la mayoría de las zonas geográficas, se triplicará para el año 2010 con relación a 1980. Un caso de especial crecimiento se reporta en el Sudeste de Asia, que en 1980 consumía 2 kg por habitante y se calcula que para el año 2010 el consumo per cápita sea de 24 kg de plástico, es decir un incremento equivalente a 12 veces en tres décadas. De cumplirse las estimaciones, el crecimiento más notorio se dará en Europa del Este con un incremento de 104 % en sólo 10 años. Los crecimientos más moderados se darán en Japón con 32% y África con 33% para el mismo período.

Consumo per capita de Plásticos en kg 1980 - 2010



Gráfica 1.5 Consumo per capita de materiales plásticos en kg, para todas las áreas geográficas del mundo. Período 1980 - 2010

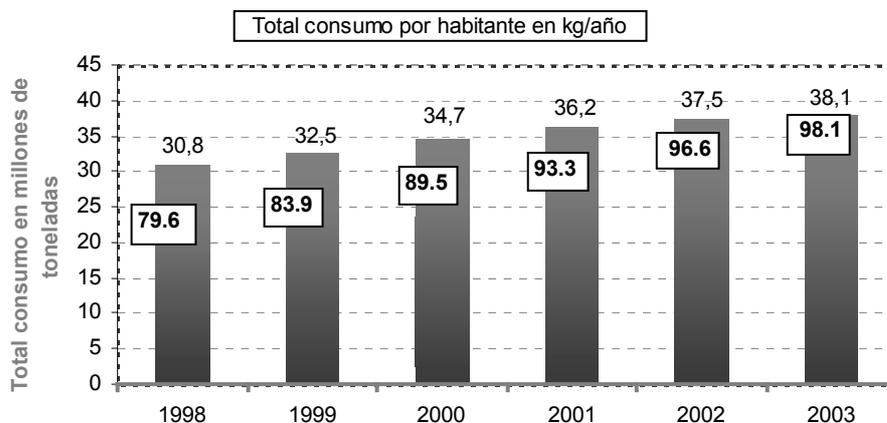
1.2.4.2 Consumo de plásticos en Europa Occidental

La industria de los plásticos en Europa Occidental permanece relativamente fuerte, con un consumo para el año 2003 de 39 706 000 toneladas de polímeros, mostrando un incremento del 1,9 % con respecto al año 2002 (38 966 000 T) y un 5,6% más que en el 2001 (36 168 000 T). Considerando las aplicaciones no plásticas, el total del consumo de termoplásticos y termofijos en Europa Occidental fue de 48 788 000 toneladas para el año 2003. El crecimiento moderado en el consumo (1,9%) que reflejan los datos del 2002 al 2003, indican un relativo estancamiento debido al descenso de la economía global y a los conflictos en el Medio Oriente, provocando inestabilidad en los precios del petróleo e impactando negativamente a la industria de los plásticos. Los signos de recuperación que muestra la economía mundial y la fortaleza del mercado asiático, indican una recuperación más positiva para el año 2004 [APME 05].

Con respecto al consumo por habitante en Europa Occidental, se calcula una cifra de 98 kg en el año 2003, contra los 96,6 kg del año 2002, esto significa un aumento del 1,6% más de consumo per capita en un año.

La gráfica 1.6 ofrece datos del consumo de plásticos vírgenes y no incluye las aplicaciones no plásticas como son fibras, cintas, acabados, pegamentos, elastómeros y compuestos para envases como LDPE en película para envases de líquidos. Tampoco toma en cuenta la importación y la exportación de envases vacíos o llenos.

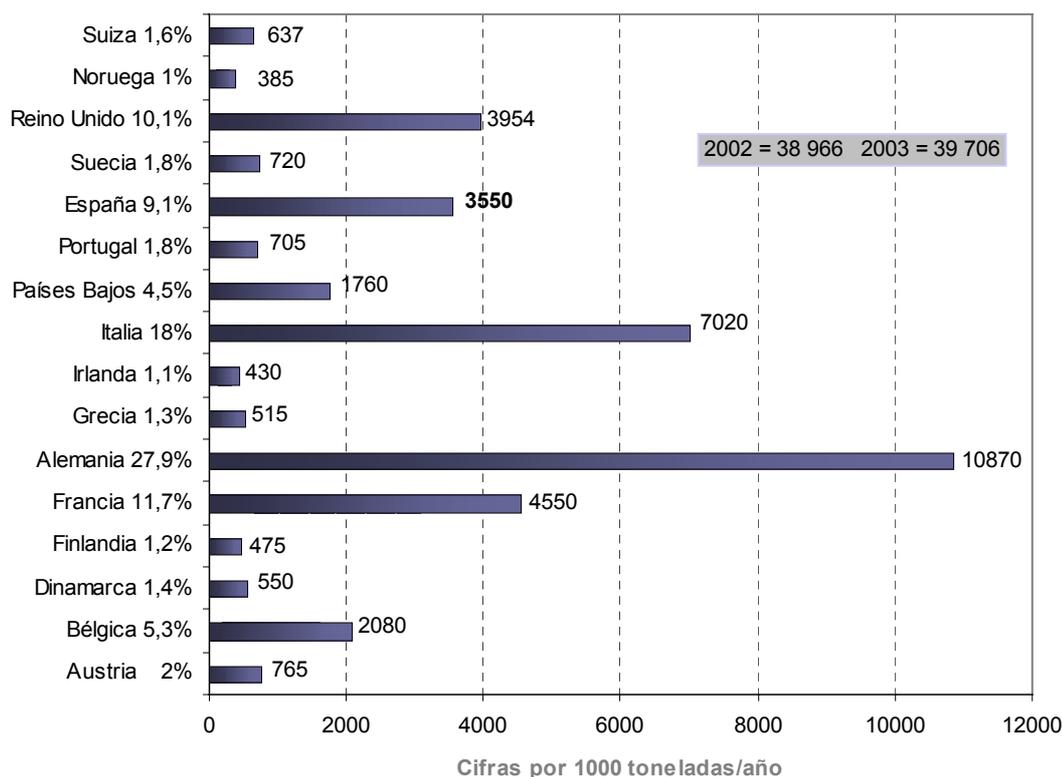
Consumo per capita de plástico virgen. Europa Occidental 1998-2003



Gráfica 1.6 Consumo de plástico virgen per capita y consumo global en Europa Occidental, 1998 - 2003

Fuente: APME. (2005). *Plastics in Europe*. Reporte verano 2004. Bruselas: APME. p: 5.

Consumo de procesadores de plásticos por país. Europa Occidental 2003



Gráfica 1.7 Datos de consumo de plástico por país en Europa Occidental, 2003

Fuente: APME. (2005). *Plastics in Europe*. Reporte verano 2004. Bruselas: APME. p: 5.

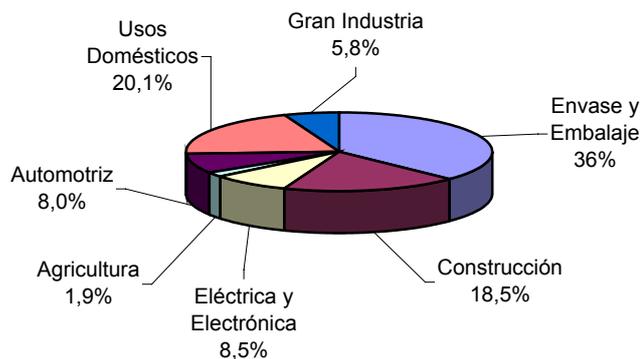
Los datos de consumo de los procesadores que ofrece la gráfica 1.7, se refiere al consumo de plástico virgen en aplicaciones no plásticas por país en Europa Occidental en el año 2003.

El consumidor más intenso sigue siendo Alemania con 10 870 000 toneladas. España se ubica en el quinto lugar con un consumo de 3 550 000 toneladas, después de Italia (7 020 000 T), Francia (4 550 000 T) y Reino Unido (3 954 000 T).

Con respecto al consumo por sectores de la industria en el año 2003, el mayor consumidor sigue siendo el sector del envase y embalaje con un 37,2% del total y una cifra de 14 764 000 toneladas. Este sector permanece estable en relación al año 2002 con un crecimiento del 1,3%. La fortaleza de la industria del envase y embalaje se debe en buena medida, a que continúa sustituyendo a materiales tradicionales de embalaje y que se traduce en un beneficio para el medioambiente. De hecho, se puede señalar que el 50% de los productos europeos están embalados en plástico, aunque su peso sólo alcance el 17% del sector [APME05].

El sector de la construcción consumió 7 350 000 toneladas de plástico en el año 2003 y un total del 18,5% del total de consumo de plásticos en Europa Occidental. Esta rama ocupa el tercer lugar después del sector del envase y embalaje y del doméstico; este último con un porcentaje del 20,1% del total de plásticos. El crecimiento del sector de la construcción con respecto al año 2002, fue del 2% en el año 2003 y es indicativo de la recesión que experimentó esta actividad en Europa. En el caso específico de España, la demanda de plásticos empleados en el área de la construcción en el 2003, creció un 5% en relación al año anterior [PLAS/U04].

Consumo de Plásticos por sector en Europa Occidental 2003



Gráfica 1.8 Consumo de plásticos por aplicaciones en Europa Occidental, 2003

Fuente: APME. (2005). *Plastics in Europe*. Reporte verano 2004. Bruselas: APME. p. 5.

1.2.4.2.a Gestión de residuos de plásticos en Europa Occidental

El ritmo de crecimiento de la industria productora de plásticos vírgenes en Europa Occidental, plantea un gran reto al momento de gestionar de forma eficaz el volumen de vertidos que este éxito provoca [AGUAD03]. Mientras que el consumo de plásticos creció un 5,6% en dos años (2001-2003), el aumento en la proporción de plásticos recuperados para el mismo período es del 2%.

El total de plástico presente en el flujo de residuos en 2003 fue de 21 150 000 toneladas, donde el 39% (8 230 000 T) es la cantidad de residuos que fueron aprovechados, de esta manera se puede determinar que el 61% de los plásticos permanecen en los residuos sólidos urbanos para ser destinados a los vertederos o a la incineración sin la recuperación de energía.

La recuperación energética sigue siendo la tecnología más usada el aprovechamiento de los residuos de plástico desviados de vertedero, con una cifra de 4 750 000 toneladas que equivale

al 22,4 % del total recuperado para el 2003, seguido del reciclaje mecánico con 14,7 % y por último del reciclaje químico con el 1,6 % (ver tabla 1.2).

Tabla 1.2 Total de plástico recuperado en Europa Occidental 1998 - 2003, en cantidad (x 1000 toneladas) y porcentaje

Técnica	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Total de residuos de plástico	18 457	19 166	19 341	19 980	20 607	21 150
Reciclaje mecánico	1 614	1 888	2 213	2 521	2 808	3 130
Reciclaje químico	361	346	329	298	330	350
Recuperación energética	3 834	3 949	4 411	4 583	4 678	4 750
Total en recuperado %	31%	32%	36%	37%	38%	39%

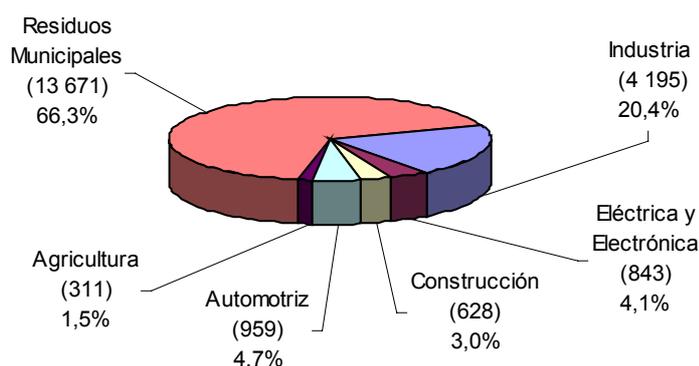
Fuente: Asociación Europea de Fabricantes de Plástico.(2004) Bruselas: APME. p: 9.

El total de residuos vertidos en Europa Occidental en el 2002 fue de 2 722 millones de toneladas, mientras que los plásticos de post-consumo colectados fueron 20,6 millones de toneladas; la proporción es de *menos del 1%* con relación a su peso, que no obstante representa una cantidad significativa de recursos valiosos en términos de material y energía involucrados para su obtención.

La mayoría de los residuos de plástico en Europa Occidental en 2002 lo constituyeron los residuos sólidos municipales con 13 671 000 toneladas y que representa el 66,3% del total. Por su parte la industria contribuyó con 4 191 000 toneladas equivalente a un 20,3% del total mientras que el resto de los sectores muestran cantidades menores (gráfica 1.9).

Total colectable de residuos de plásticos de postconsumo por sector, Europa Occidental 2002

(por 1000 toneladas/% por peso)



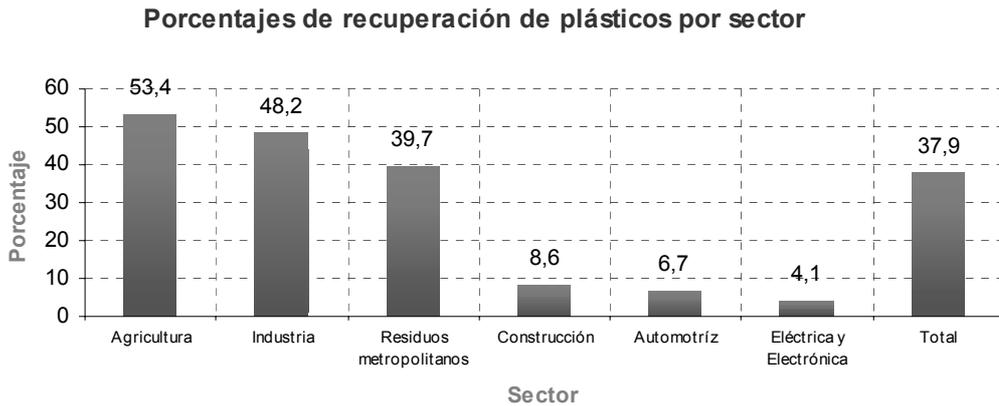
Gráfica 1.9 Total de residuos de plástico de post-consumo colectables por sector en Europa Occidental en el año 2002

Fuente: AMPE (2005). *Plastics in Europe*. Reporte anual. Bruselas. p: 10.

La búsqueda de los productores europeos por mantener el valor de los recursos contenidos en los plásticos al final de su utilización, ha permitido incrementar su recuperación en un porcentaje de 0,9% constante para el año 2002 (37,9%) con respecto al 2001, de la misma

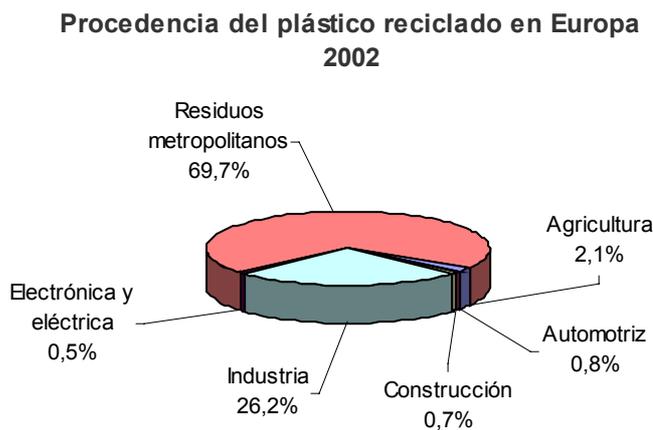
manera que para el año 2003 se repitió ese incremento en la recuperación de plásticos del 0,9% con respecto al 2002 (ver tabla 1.2).

Los tonelajes más altos de plástico recuperados se dieron en el sector de los residuos metropolitanos con un total de 5 449 000 T (39,7% del total) durante el año 2002. Sin embargo los mejores resultados en porcentaje de recuperados (incluye recuperación energética y reciclaje) con relación al total colectado se dan en la agricultura (53,4%) y en la Industria (48,2%), mientras la cifra más baja se da en el sector de eléctrico y electrónico con 4,1% del total colectado en ese mismo sector (gráfica 1.10).



Gráfica 1.10 Recuperación en porcentajes de plástico por sectores contra el total colectado dentro del mismo sector, 2002

De la gráfica 1.11 se puede señalar que del total de plásticos reciclados en Europa para el año 2002 (5,4 millones de T) el 66% son plásticos procedentes del área de Residuos metropolitanos, muy por arriba del resto de los otros sectores y el segundo sitio con 26,2%, de los residuos originados en la Industria y distribución. Esto indica la importancia de su presencia ya que entre los sectores de Residuos metropolitanos y la Industria y distribución participan con el 95,9% del total de plástico reciclados en Europa durante el año 2002.



Gráfica 1.11 Procedencia de los plásticos reciclados en Europa Occidental por sectores en el año 2002. No incluye recuperación energética

Los destinos de los plásticos reciclados en Europa por sectores en el año 2002 se dividieron de la siguiente manera:

- Usos de distribución 40%
 - Como la fabricación de film de embalaje 74%, de cajas 10%, palets 14% y cintas 2%.
- Construcción 30%
 - Tubos 40%, recubrimiento de cables y cables multifilamentos 8%, ventanas 5%, y 47 % repartido en otras aplicaciones como cargas de aislamiento para la fabricación de elementos constructivos, cercas y fabricación de pisos.
- Usos domésticos 20%
 - Fibras 47%, mobiliario 22%, envases 18%, cestos y papeleras 4% y otros usos domésticos 10%.
- Productos varios fabricados con plásticos reciclados 10%
 - Partes automotrices 25%, señales de tráfico 20%, botellas 20%, aplicaciones agrícolas 16%, juegos 7% y otros usos 12%.

1.2.5 DATOS DE PRODUCCIÓN Y RECICLAJE DE EPS

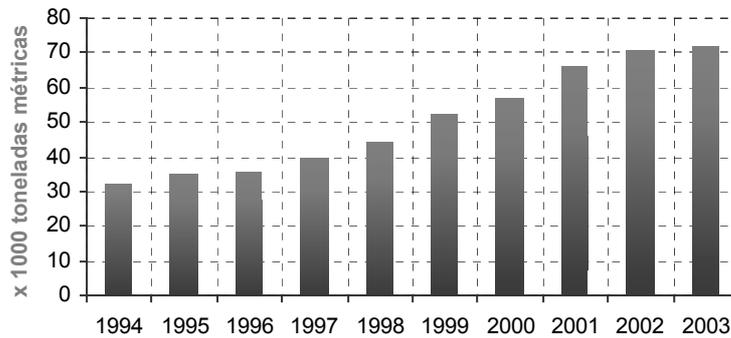
1.2.5.1 La industria productora de EPS

Los materiales espumados de resinas de poliestireno junto con los de poliuretano, son los principales plásticos celulares en cuanto a sus montos de producción y de su notoria presencia en la vida diaria. La importancia de este material se muestra en el hecho de que el consumo de EPS en España por habitante fue de 1,5 kg para el año 2000 y que ese mismo consumo para la media europea occidental fue de 2,2 kg, mientras que por otra parte, el consumo total de plásticos por habitante de Europa para el mismo año fue de 89,5 kg [APME05].

Después de su aparición en el mercado durante los años cincuentas, el consumo de EPS se desarrolló de manera constante y vigorosa hasta los primeros años de los setentas, cuando decayeron sus tasas de crecimiento y que no se recuperaron sino hasta 1977. A partir de 1981 el consumo de EPS en el mundo occidental creció prácticamente todos los años de forma moderada pero sostenida [DEGRA81] [RIETHU91].

En España desde 1994 el crecimiento de la industria del EPS ha sido constante, como lo muestra la gráfica 1.12, donde se observa que el crecimiento promedio para el ciclo 1994-2000 fue de 11% con variaciones positivas importantes de un año a otro, que se acercaron al 17% en 1994 y 18% para 1999. Entre los años 2001 a 2003 las cantidades de producción ha tendido a estabilizarse.

Evolución de la producción de EPS en España

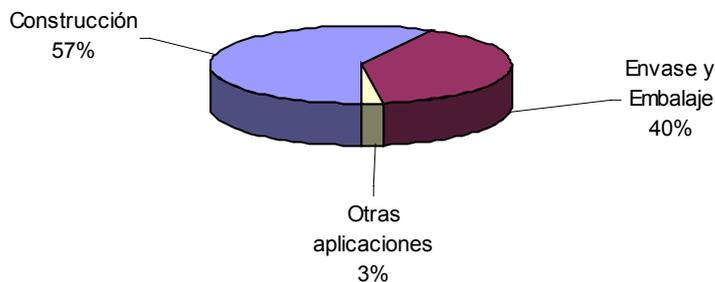


Gráfica 1.12 Crecimiento de la producción de EPS en España, 1994 - 2003
Fuente: Fichero ANAPE. (2004) *El poliestireno expandido*. Sector EPS 4.

En España el sector del EPS agrupa a 6 empresas proveedoras de materia prima (4 productoras y 2 comercializadoras) la mayoría asentadas en Cataluña y cerca de 60 empresas transformadoras para producto terminado que están distribuidas en el resto del Estado Español. En el entorno europeo y con las cifras reportadas para el año 2002, España con una producción cercana a 70 700 T y una producción estimada de 71 800 T para el 2003 (incluidas todas los usos de la espuma), ha pasado a ser el tercer productor de EPS en Europa compartiendo este lugar con Italia y sólo detrás de Alemania y Francia [ANAPE04].

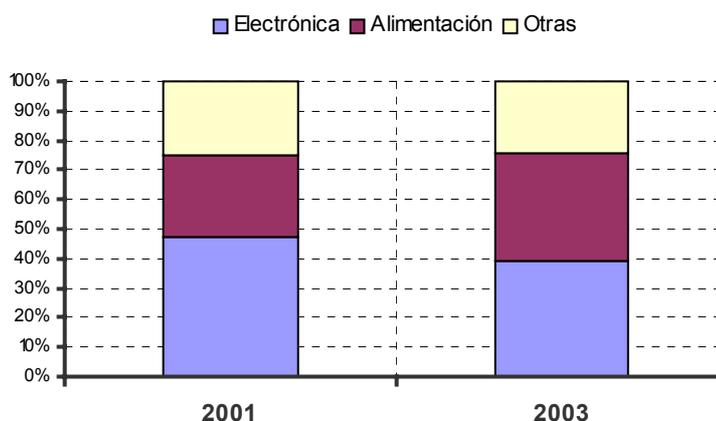
Por lo que respecta a las aplicaciones de esta producción, en el año 2002 del total de la producción España un 57,8% (41.500 TM equivalente a 2,5 millones de m³) se destinó a usos en la construcción, un 39,7% (28.054 TM) a envase y embalaje y finalmente 2,5% (1767,5 TM) a otros usos como juguetes, artículos deportivos, etc. (gráfica 1.13). Esto indica la importancia del mercado de la construcción para la industria del EPS [LOPEZ04].

Desglose de aplicaciones del EPS en España



Gráfica 1.13 Aplicaciones generales de las espumas de EPS en España
Fuente: Horcajada, D. (2005). El EPS en el envase y embalaje. *Revista de Plásticos Modernos*. 89(584): 152.

No obstante que los datos observados para la industria hasta el año 2003 han sido positivos se han visto marcados, como en el resto de Europa Occidental, por el proceso de deslocalización industrial de empresas hacia el este del Continente o hacia países asiáticos. Uno de las industrias más afectadas por el fenómeno de la deslocalización ha sido el sector de la electrónica de consumo y que es un usuario tradicional de envases y embalajes de EPS. Se ha estimado que el 42,4% del mercado de embalaje de EPS puede estar en riesgo de deslocalización [ANAPE04] y la reubicación de antiguas empresas consumidoras de EPS español hacia otros lugares del mundo, ha llevado a los productores locales a derivar sus esfuerzos de venta hacia otros mercados menos volátiles, como es el caso de la alimentación, con cajas de pescado, envases de productos agrícolas y el de contenedores para cárnicos. La tendencia a este traspaso de tipos de productos de EPS dentro del área del envase y embalaje se observa en la gráfica 1.14. La misma tendencia se observa en el resto de productores europeos [HORCA05].

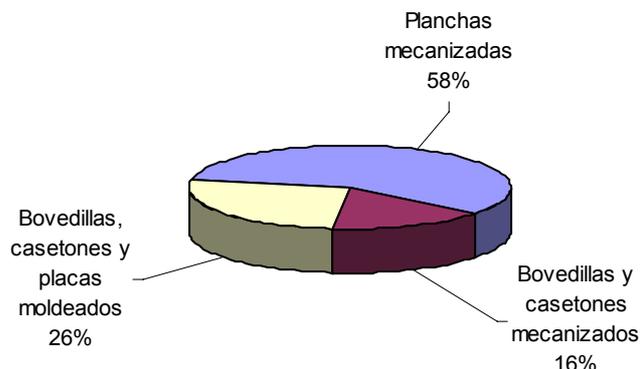


Gráfica 1.14 Tendencia de traspaso de uso del EPS de unas aplicaciones a otras

Por lo que corresponde a las grandes aplicaciones de la espuma en España se ofrecen algunas precisiones:

Al EPS en la *construcción* se le aprovecha fundamentalmente en varias funciones o en una combinación de ellas: como aislamiento térmico en diferentes cerramientos y como aligerante de algunos elementos constructivos y para la generación de formas como rellenos, núcleos y encofrados. También comienza a usarse con mayor frecuencia como base en la construcción de obras mayores como carreteras e industrias (ver anexo A 1). Una distribución más detallada de las aplicaciones de EPS en la construcción para el año de 2002:

Desglose de aplicaciones en la Construcción



Gráfica 1.15 Distribución por tipología de productos de EPS en la construcción

Fuente: López, C. (febrero 2004). El EPS en la construcción. *Revista de Plásticos Modernos*. 87(572): 126.

Como se observa en la gráfica en las aplicaciones del EPS en la construcción una parte muy importante de sus consumos se da en bloques transformados en planchas que se usan generalmente en aislamiento de muros y particiones, mientras otra aplicación del EPS mecanizado se usa para fabricar forjados. Estas dos aplicaciones suman el 74% del total del consumo de la espuma en la construcción, mientras aplicaciones que involucran el uso de EPS en usos más especializados como son moldeados aporta el 26%.

En España, el área de *envase y embalaje* con un consumo de 28.232 T en el año de 2003, se observan dos aplicaciones que en conjunto hacen el mayor consumo del área, que son la de Alimentación, y la de Embalaje de electrodomésticos y electrónica de consumo.

La alimentación con 35,5% (10.031 T) del total del área de envase y embalaje de EPS mostró un crecimiento del 5,1% con respecto al año 2002. El embalaje de electrónica de consumo ocupó el 35,2% del total para el 2003 y mostró un retroceso en su crecimiento del -9,42% con relación al año anterior y que se atribuye al fenómeno de la deslocalización de la industria de la electrónica en España.

Otras aplicaciones de interés aunque que con menor participación son las de horticultura y jardinería con 7,7% y que también decreció sensiblemente con -14,8 % con respecto al año 2002, y embalajes para mobiliario con 4,6% que se mantuvo con un crecimiento discreto del 1,7%.

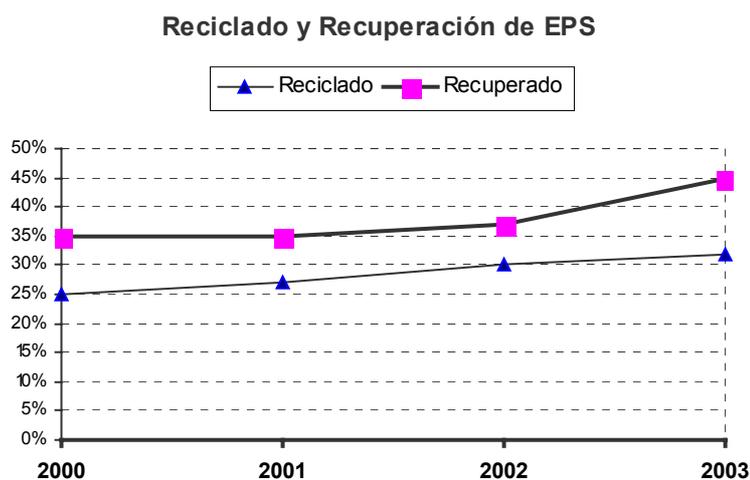
Desglosando los usos particulares que se le dan en al año 2003 a las espumas de EPS en los envases de alimentación, se indica un predominio de las cajas para pescado con casi el 84% (8.426 T) del total y seguido de las cajas para cárnicos con el 6,2% y el resto repartido entre aplicaciones de envase de alimentos diversos.

En el área particular los envases y embalajes de electrónica de consumo y electrodomésticos, el desglose indica un predominio importante de los electrodomésticos con el 77,5% (7.705 T) del total y el resto para electrónica de consumo y una mínima participación de embalaje de informática.

1.2.5.2 Recuperación y reciclaje de EPS en Europa Occidental

Las tasas de recuperación y reciclaje de EPS en Europa Occidental muestran un constante aumento: para el año 2000 se determinó una tasa de reciclaje del 25% y para el año 2001 esta fue del 27%, de 30% para el 2002 y de 33% para el 2003.

Como se observa en la gráfica 1.16 la relación entre el EPS recuperado y el reciclado disminuyó entre los años 2000 y 2002, para nuevamente aumentar en el año 2003. Esto se puede interpretar como un aumento de la recuperación energética acompañada de una disminución en el porcentaje de las formas usuales de reciclaje de EPS.

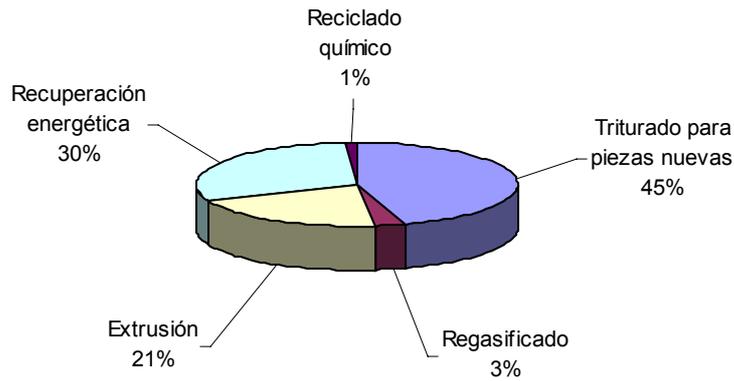


Gráfica 1.16 Reciclado y recuperación de EPS en Europa, 2000 - 2003
Fuente: ANAPE. (septiembre 2004). *Boletín 15 EPS*. Madrid: ANAPE.

Sin embargo se resalta el hecho que los niveles de recuperación del EPS promedio en Europa no ha dejado de crecer desde el año 2000 hasta alcanzar un 45% para el año 2003.

Por lo que respecta a las técnicas que se aplican para el recuperación de la espuma en Europa Occidental en el 2003, hay un claro predominio del triturado con 45% con respecto al total y que se destina a diversos usos como cargas en la fabricación de nuevas piezas de EPS o como aligerante en elementos constructivos. Le sigue al triturado la recuperación energética con el 30% y con el 21% la densificación y transformación en material sólido para moldeo, finalmente se encuentra el regasificado con 3% y el reciclado químico con el 1% [EUMEPS05]. Gráfica 1.17.

El año 2003 por países Europeos Occidentales mostró una gran heterogeneidad tanto en los niveles de reciclado como en las vías usadas. Austria (95%) y Alemania (78%) encabezan el apartado de cantidad de reciclado contra el total recuperado, mientras España (18%) y Portugal (9%) fueron los dos países con los menores porcentajes. Por lo que respecta a las vías de recuperación encontramos también una alta desigualdad entre los países europeos donde se observa que la técnica predominante es el triturado seguido por la densificación y pelletización. Sin embargo la recuperación energética es casi la única técnica usada en los países Nórdicos. Las técnicas de reciclado químico y de gasificación son sólo escasamente usadas en Alemania y Gran Bretaña.

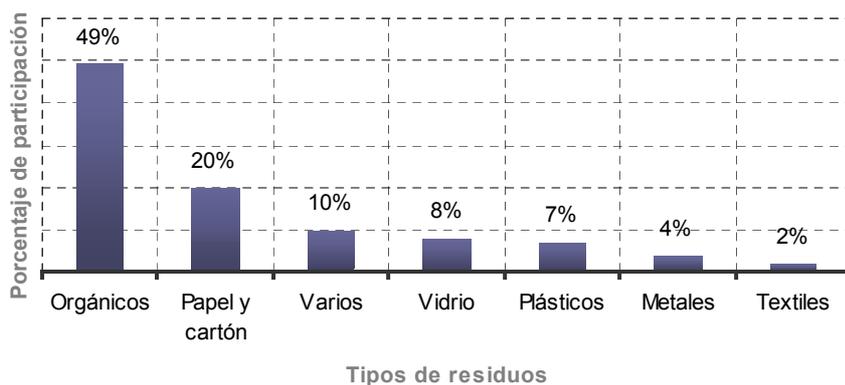


Gráfica 1.17 Vías de Reciclado de EPS en Europa Occidental, 2003
 Fuente: Horcajada, D. (febrero 2005). *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid: CSIC. p. 155.

1.2.5.2 a Recuperación y Reciclaje de EPS en España

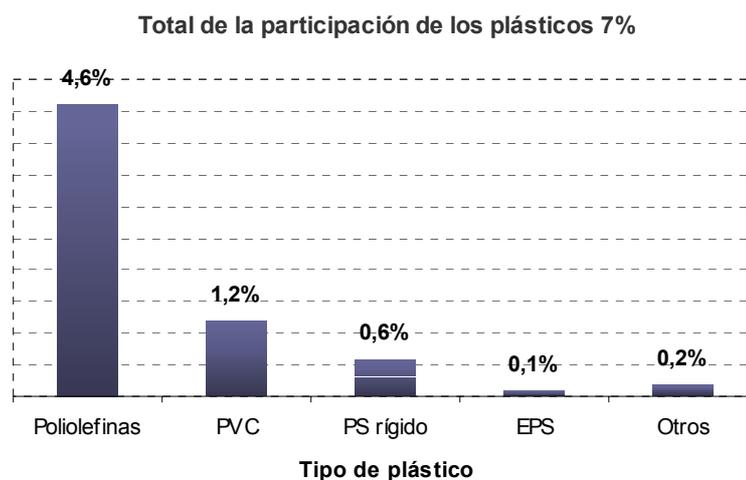
Desde su aparición en el concierto de los materiales y por sus propiedades el EPS ha invitado a reciclarlo. Al dejar de ser útil, el EPS ha de ser dispuesto para el flujo de residuos. Entre los usos de la espuma encontramos algunos que se desarrollan en largos ciclos de vida como son los materiales de aislamiento térmico para la construcción, por lo cual su ingreso a los residuos es más lento, pero otras aplicaciones como las de envase y embalaje se suman rápidamente a los residuos a gestionar.

La percepción de la población es que los plásticos, incluyendo al EPS, aportan grandes cantidades al flujo de residuos, sin embargo la relación peso-volumen de todos los plásticos y sus llamativos colores sólo lo hace parecer así; al observar la participación por peso de los plásticos en el total de residuos municipales, se nota que esa imagen negativa es inexacta ya que los residuos en el año 2000 participaban con el 7% del total por peso de los residuos municipales, abajo de otros residuos de materiales como el cartón y el papel o el vidrio (ver gráfica 1.18).



Gráfica 1.18 Composición de los residuos municipales en España por peso, año 2000

Del 7% que aportan los plásticos por peso al flujo de residuos municipales se puede determinar una distribución de esos residuos por tipo de plástico y que se expone en la Gráfica 1.19.



Gráfica 1.19 Diferentes tipos de plásticos en los residuos municipales

En la gráfica 1.19 se expone que el EPS participa del total de residuos municipales con el 0,1% del total por peso, sin embargo su baja densidad y su brillante color blanco lo destacan entre otros residuos, por lo cual es fácil sobredimensionar su presencia en el total del flujo residuos.

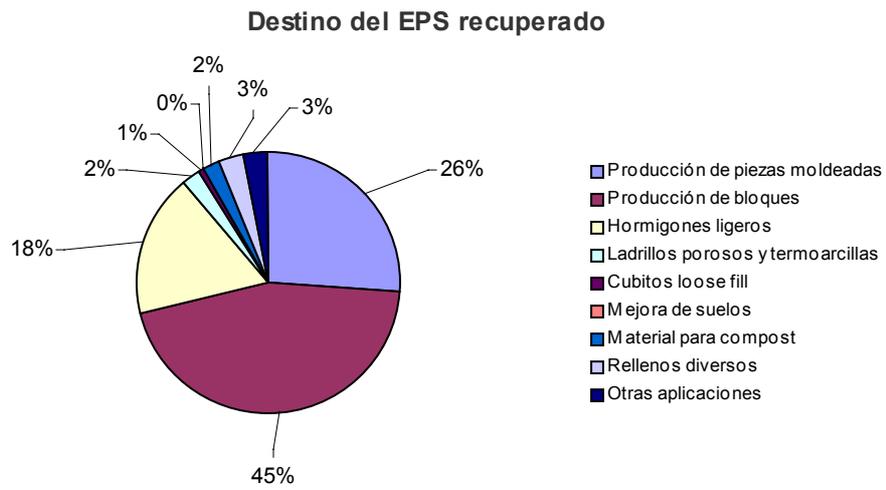
Se estima que en la Unión Europea se produjeron en 2003 un total 195.000 T de EPS con destino a la fabricación de Envase y Embalaje [HORCA05] si consideramos que casi la totalidad de los residuos de EPS provienen del sector de Envases y Embalajes y que la recuperación europea de la espuma asciende a un 45%, el total de residuos de EPS recuperados en esta zona del mundo es de cerca de 90.000 T [BARNES04] para el año 2003.

En España se indica que también la mayoría de los residuos municipales de EPS proceden de aplicaciones de Envase y Embalaje [TORRES02] [ALEGRE02] y se indica que aumenta constantemente la cantidad de EPS que se recicla en el Estado [ANAPE03].

De aquí podemos señalar que el porcentaje del total de la producción que se recupera de EPS en España se estima en 17,5%, así que si la producción de EPS para el 2003 fue de 70.700 T la recuperación para ese mismo año es de cerca de 12.372 T, de las cuales se recuperaron energéticamente 9.721 T (13,7%) y se reciclaron 2.651 T (3,75%), lo que deja a 15.859 T de residuos de EPS de envases y embalajes susceptibles de ser aprovechadas.

Por otra parte el destino de los materiales reciclados de EPS en el Estado Español se distribuyó de la siguiente manera (ver gráfica 1.20).

De la Gráfica 1.20 podemos señalar que el mayor segmento en el año 2000 correspondió a aplicaciones que usan la espuma triturada con 72% donde se aplica principalmente como material para formar nuevos bloques de reexpandido y para aligerar elementos constructivos, mientras otras aplicaciones no reportadas ocupa un 15% de el material reciclado y se densifica para material de moldeo un 10%.



Gráfica 1.20 Destino del EPS recuperado en España, 2003
Fuente: ANAPE. (mayo 2004). Boletín 14 del EPS. Madrid: ANAPE.

2

ESTRUCTURA DE LA TESIS



2 ESTRUCTURA DE LA TESIS

2.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Con atención a lo mostrado a lo largo de la investigación preliminar surgen las siguientes preguntas:

¿Se puede alargar el ciclo de vida de los residuos de espuma de EPS, conservando la mayor parte de sus propiedades que como plásticos celulares aún tienen al momento de ser incorporados al flujo de los residuos?

¿Se pueden lograr nuevas oportunidades de aplicación de los residuos de espuma de EPS mezclándolos con materiales tradicionales de construcción?

¿Se pueden aprovechar las propiedades de los residuos de espuma de EPS para mejorar o inclusive, para sustituir elementos constructivos de aislamiento térmico usados actualmente?

¿Son viables los elementos constructivos fabricados con procesos sencillos y mezclas de conglomerantes hidráulicos comunes y residuos de espuma de EPS?

De las preguntas de investigación se ha desprendido que esta tesis busca mostrar que a través del uso de tecnologías básicas, se pueden hacer aportaciones para la mejora de la calidad de vida de la sociedad actual, rescatando plásticos espumados de EPS los cuales después de una aplicación muy breve y usualmente intactos, pasan a aumentar en peso pero principalmente en volumen la cantidad de residuos sólidos a gestionar.

2.2 HIPÓTESIS

Este trabajo ha atendido de forma específica las hipótesis siguientes:

2.2.1 HIPÓTESIS DE POSIBILIDAD

Los envases y embalajes de espuma de EPS destinados al flujo de residuos municipales, pueden ser rescatados para su reciclado con técnicas sencillas que permiten conservar una parte importante de su utilidad como plástico celular.

Es posible y viable la innovación en elementos constructivos específicos, fabricados con procesos sencillos y partiendo de una mezcla formada por residuos acondicionados de espuma de EPS y de conglomerantes hidráulicos comunes en la construcción como son el yeso y la escayola.

2.2.2 HIPÓTESIS DE EFECTIVIDAD

Las mezclas de residuos de espuma de EPS con yeso o escayola serán materiales heterogéneos con características significativas y novedosas para sus potenciales usuarios. Conocer y cuantificar esas características será importante para la mejor aplicación de las mezclas. Para determinar la funcionalidad de los materiales propuestos y de los elementos constructivos fabricados con ellos, serán necesarios la observación de las normas y los ensayos de laboratorio correspondientes.

2.2.3 HIPÓTESIS DE BENEFICIO

El uso de residuos de espuma de EPS en los materiales heterogéneos propuestos y los elementos constructivos fabricados con ellos tiene un doble beneficio para el medioambiente. Por un lado coopera a disminuir la demanda de materiales plásticos espumados vírgenes y de materiales para la edificación. Por otro lado también coopera a disminuir la presencia de residuos espuma de EPS en los vertederos.

2.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo principal de esta investigación es estudiar una manera particular de reciclaje de residuos de espuma de EPS que permite aprovechar las propiedades que aún tiene el plástico celular al momento de ser enviado al flujo de los residuos municipales.

Esta forma de reciclaje consiste en la formación de mezclas con varios componentes; por un lado espumas de EPS acondicionadas y por el otro, un conglomerante hidráulico de yeso o escayola en diferentes proporciones y bajo diferentes circunstancias para ser usados en la fabricación de placas y paneles para la construcción.

Otros objetivos relacionados son:

- Determinar las proporciones adecuadas de los componentes de el (los) nuevo (s) material (es) para ser usados en la fabricación de placas y paneles para la construcción.
- Identificar las propiedades y características principales de los elementos constructivos propuestos para conocer sus cualidades y limitaciones.

2.4 ALCANCES DE LA TESIS

El yeso y la escayola son materiales constructivos por excelencia. Su abundancia en amplias zonas del mundo y su nobleza han hecho de ellos el objetivo de innumerables trabajos de investigación desde la perspectiva de diversos campos de la ciencia. Sin embargo, visto en retrospectiva, el esfuerzo de investigación acerca del yeso y la escayola muestra una producción poco constante, abundante en ciertas ocasiones y escasa en otras, producto tal vez de la moda o de las técnicas constructivas del momento. La investigación acerca del reciclaje de materiales plásticos muestra una conducta similar y parece corresponder más a momentos políticos o a demandas empresariales específicas, que a la necesidad misma de la sociedad acerca de posibles soluciones para el problema de los residuos de materiales plásticos.

Se sabe de la gran cantidad que hay por separado de información e investigación en curso acerca de los plásticos y del yeso o la escayola, sin embargo observando esos conocimientos como un sólo conjunto, se han encontrado áreas con un potencial de aplicación interesante y que sin embargo se encuentran poco exploradas y poco explotadas. El estudio de las mezclas de conglomerantes hidráulicos, entre ellos el yeso y escayola con agregados de plástico, es una de esas áreas. En particular, es aún más escasa la investigación acerca de mezclas de esos conglomerantes con residuos espuma de plástico.

La investigación se encamina a:

- Usos de residuos de espuma de EPS.
- Uso de residuos de EPS en elementos constructivos.
- Caracterización de materiales compuestos de yeso o escayola/agua y residuos de EPS.
- Caracterización de mezclas de EPS con yeso y escayola con aportaciones de agua en diferentes proporciones.

Los elementos constructivos que se han caracterizado son de dos tipos:

- a. **Placa** de yeso o escayola con residuos de EPS con espesor de 12,5 mm y con recubrimiento de cartón o papel.
- b. **Panel** de residuos de yeso o escayola con espesor de 30 mm

Algunas propuestas o combinaciones de ellas se han investigado aunque de manera incipiente, ya que se han considerado fuera del alcance de esta tesis.

Finalmente las limitaciones de la investigación se resumen así:

- La experimentación se centra en las mezclas de yeso o escayola de origen natural con residuos de EPS molidos o cortados.
- Los ensayos se acotan a los laboratorios y equipos disponibles para el investigador dentro de la Universidad Politécnica de Catalunya. Estos ensayos son: absorción de agua, de compresión, de densidad laminar, de densidad aparente, de flexión, de reacción al fuego y de resistencia la impacto.
- La ensayos necesarios para determinar las características de transmisión de calor de los elementos investigados se limitan a la disponibilidad del equipo en la localidad. Concretamente se han podido caracterizar dos probetas de la mezcla número 65 de panel, en el laboratorio de Foc i Termotecnia de la empresa Applus, Barcelona.
- Los métodos de los ensayo y las características de las muestras y probetas buscan cumplir lo marcado por las Normas correspondientes. Cuando esto no sea posible se aceptarán la adecuaciones necesarias, asentándolas y considerando el hecho durante los análisis, especialmente en lo que se refiere a las dimensiones de las probetas.
- No se profundiza en la unión de celulosa y los núcleos de yeso o escayola con residuos de EPS. Sólo como un acercamiento al tema se ha decidido experimentar con almidón común en algunas muestras fabricadas con fórmulas ricas en conglomerante, al igual que con la aplicación de pequeñas cantidades de presión sobre las probetas.

- No se han hecho ensayos de permeabilidad al vapor de agua y sus posibles consecuencias. En algunas composiciones de probetas y su aplicación en construcción, podría ser necesario una corrección con barrera de vapor.
- La evaluación de las probetas se ha hecho mayoritariamente según el criterio del autor, analizando y puntuando diversos aspectos a su juicio, así como las observaciones de los resultados de algunas pruebas.

No se han estudiado otros temas como:

- Los Análisis de Ciclo de Vida de los elementos propuestos
- Los procesos de producción y viabilidad económica de los elementos propuestos
- El comportamiento acústico de las placas y los paneles con residuos de EPS

Los datos de los materiales comerciales encontrados en los ensayos han de ser tomados sin valor contrastado y sólo se han usado a efectos de comparación con los materiales propuestos en esta tesis. No es la intención de esta investigación validar las cifras ofrecidas por los fabricantes de placas de yeso laminado o de los paneles de EPS virgen. Las características de los materiales comerciales se han obtenido de las normas correspondientes para cada caso y se corroboraron en los ensayos que cumplen con los mínimos exigidos en ellas.

2.5 METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES

La planificación de la metodología para el desarrollo de esta tesis contempla labores de investigación documental y de campo, además de un intenso trabajo experimental.

La metodología usada se puede simplificar en cinco etapas:

1. Investigación preliminar
2. Propuesta de soluciones
3. Trabajo experimental
4. Análisis de resultados
5. Propuestas de aplicación

2.5.1 INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

Aquí se realiza una recolección de información y una revisión crítica de los temas fundamentales del problema. Los elementos básicos se dividen en dos grupos que se retroalimentan constantemente a lo largo de la investigación:

- **Elementos generales**

Tienen como fin ampliar la comprensión del investigador acerca de la problemática del medioambiente y en la cual se ha de insertar cualquier propuesta que resulta de esta investigación.

- **Elementos específicos**

Es información principalmente de carácter científico técnico y del estado del arte que permite al investigador realizar la tesis propiamente dicha.

En esta primera etapa se cumplieron actividades que permitieron obtener, organizar y analizar la siguiente información.

2.5.1.1 Elementos generales

Problemática medioambiental

- El pensamiento medioambiental
- Sostenibilidad
- Ecoeficiencia
- Gestión medioambiental
- Producción más limpia
- Ecodiseño

Residuos

- Residuos municipales (RM)
- Sistemas de recogida, transporte y clasificación de los RM
- Tratamientos para la recuperación de materiales dispuestos en los residuos
- Sistemas de recuperación con obtención de energía
- Obtención de composta de los residuos orgánicos
- Soluciones de vertedero para los residuos
- Productos con origen en los residuos o productos donde participan residuos

Industria mundial y local de plásticos

- Estado de la industria
- Consumos y sectores de aplicación por tipo de plástico

Reciclaje de residuos de plástico

- Recolección y recogida de los residuos plásticos
- Tecnologías para la recuperación y reciclaje de plásticos
- Patentes sobre técnicas de reciclaje de plásticos y productos de plásticos reciclados

Una vez que el avance de la investigación lo permitió, los trabajos de investigación básica se centraron en temas definidos.

2.5.1.2 Elementos específicos

- Tipos de espuma de plástico
- Formación de las espumas de plásticos
- Características de las espumas de plástico
- Espuma de poliestireno expandido EPS
- Proceso de fabricación de la espuma de EPS
- Propiedades y aplicaciones de la espuma de EPS
- Estado que guarda la industria del EPS

De forma especial se ha profundizado en los siguientes temas relacionados con la espuma de EPS.

- Aplicaciones de la espuma de EPS en la construcción
- Manejo de los residuos de espuma de EPS
- Procesos de recuperación y reciclaje de la espuma de EPS

Dadas las características de la propuesta de este trabajo se ha investigado acerca de:

- Materiales plásticos en la construcción
- Agregados de plástico en la construcción
- Conglomerantes hidráulicos en la construcción

Una vez determinado el uso de yeso o escayola como el conglomerante del nuevo material se ha indagado sobre:

- Orígenes y procesos de fabricación del yeso y escayola (YE)
- Industria mundial del YE
- Aplicación del YE en la construcción
- Elementos constructivos prefabricados de YE

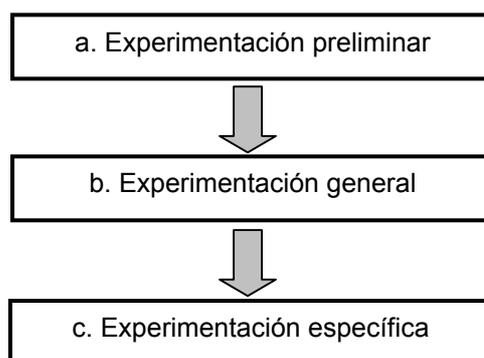
2.5.2 PROPUESTAS DE SOLUCIONES

Con un cuerpo de información apreciable, el investigador se ha dado a la tarea de organizar y analizar la información obtenida, para después desarrollar las conclusiones que le han permitido producir un flujo de ideas a nivel de conceptos sobre posibles soluciones al problema. Las propuestas se evaluaron y depuraron en base a su viabilidad e importancia, lo que ha resultado en dos conceptos a desarrollar y estudiar por medios experimentales: una placa y un panel donde ambos contienen residuos de EPS.

2.5.3 TRABAJO EXPERIMENTAL

La experimentación con los materiales y en las aplicaciones de interés es la etapa central de esta investigación con la cual se pretende obtener datos que permitan tomar una decisión acertada al respecto de su uso.

La etapa experimental se desarrolla en tres fases:



2.5.3.1..Experimentación preliminar

Las dudas expuestas durante el análisis de propuesta de soluciones sobre el comportamiento de los residuos de espuma al mezclarse con diversos tipos de conglomerantes y del comportamiento del conglomerante mismo, han obligado a la realización de una actividad experimental preliminar. Ésta ha tenido como objetivo establecer una comparación simple entre un número reducido de mezclas con diferentes conglomerantes y diversas formas de tratamientos de los residuos de espuma.

Por otro lado la información sobre las características de los residuos a usar en el experimento ha resultado prácticamente inexistente; esto ha determinado la necesidad de realizar un perfil de los tamaños y formas de los residuos molidos de espuma. Esta caracterización se ha hecho tomando muestras del total de residuos disponibles para el experimento y que se han obtenido de diferentes zonas de los contenedores, para después medir manualmente cada partícula.

2.5.3.2 Experimentación general

El manejo de mezclas con varios tipos de conglomerantes, de residuos con varias características y de otros componentes, ha encausado al diseño de un experimento que permitiese descartar las mezclas menos interesantes. El análisis de los resultados ha permitido disminuir a un número menor la variedad de mezclas a ensayar posteriormente con más rigor.

2.5.3.3 Experimentación específica

Con un universo reducido de mezclas y aplicaciones específicas en elementos de construcción se han diseñado experimentos de comparación simple que han enfrentado a las características

de materiales usuales en la construcción, con las características que han resultado del ensayo de las mezclas propuestas.

Para esta parte de la etapa de experimentación se han revisado diversos ensayos y sus normas correspondientes; se han elaborado probetas con diferentes formas; se han consultado especialistas y se ha trabajado en diversos laboratorios dentro y fuera del campus de la UPC.

Al final de cada ensayo se ha hecho un análisis particular de resultados lo que ha permitido la generación de conclusiones que alimentan una conclusión final para los dos tipos de aplicación de las mezclas.

2.5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la etapa de experimentación se han procesado de acuerdo a un modelo establecido para cada aplicación propuesta, de manera que ha permitido evaluar sus oportunidades para competir con otros elementos constructivos similares.

2.5.5 PROPUESTAS DE APLICACIÓN DE MATERIALES CON RESIDUOS DE EPS CONGLOMERADOS CON YESO O ESCAYOLA

En base a los resultados de las cuatro etapas anteriores, se ha sustentado la propuesta de aplicación y características específicas de productos fabricados con las mezclas ensayadas.

2.6 CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este trabajo de tesis sigue la estructura del tipo mostrado por investigaciones experimentales. La tabla 2.1 muestra la correspondencia que se produjo entre las etapas de investigación y el capítulo o tema relacionado.

El capítulo 1 comienza con una breve exposición de las razones personales que ha impulsado al investigador para desarrollar el trabajo (1.1). Después se han establecido las zonas del conocimiento que resultaron relacionadas entre sí a través de la tesis y que proporcionan una estructura básica de donde ha partido el trabajo (1.2). Entre esos temas destaca la problemática ambiental de hoy y la búsqueda de la sostenibilidad (1.2.1). De forma destacada participan del problema del entorno la presencia de grandes cantidades de residuos que han de ser gestionados (1.2.2) y por lo cual se han desarrollado diversos procesos y técnicas (1.2.2.3) las que se describen de forma general. El interés de esta investigación gira en torno de los residuos de plástico y sus procesos de reciclaje (1.2.3). El aumento de los residuos de plástico está asociado al incremento de la producción y el consumo de éstos materiales (1.2.4) por lo que en esta investigación describe de forma general los datos relacionados al fenómeno del consumo de los materiales plásticos en Europa Occidental. De manera particular se ha analizado la producción y reciclaje de EPS en España (1.2.4).

El capítulo 2 da principio al plantear una selección de preguntas que se hace el investigador y que resultan de su experiencia personal y de la investigación preliminar sobre el problema de los residuos de plástico planteadas en el capítulo 1. Las respuestas tentativas a esas preguntas se convierten en un grupo de hipótesis (2.2), hacia las cuales se concentra el trabajo posterior. Los objetivos precisan los logros a obtener cuando haya finalizado el trabajo (2.3). La investigación debe cumplir con plazos fijados de antemano y está circunscrita a recursos económicos, humanos y técnicos, los cuales en su conjunto se traducen en los alcances del proyecto (2.4).

El punto (2.5) describe de forma esquemática el proceso metodológico seguido en la investigación; también menciona los resultados de las actividades desarrolladas en cada etapa. El capítulo concluye con una descripción de la secuencia que sigue la investigación y que para mayor claridad se expresa en forma lineal en el documento de tesis.

El uso de materiales plásticos en la construcción es un campo nutrido por un grupo importante de investigadores desde los años sesentas del siglo XX. La aplicación de los polímeros en elementos de construcción es común para la edificación de hoy. Sin embargo, la utilización de materiales de plástico reciclado para la construcción y en especial el uso de espumas de plástico recicladas, son campos aún por explorar con profundidad.

Tabla 2.1 Correspondencia entre la estructura de la tesis y las etapas típicas de un modelo experimental

Etapas de la investigación experimental	Capítulos de la tesis
Descubrimiento de una necesidad y planteamiento del problema	Capítulo 1. Introducción Capítulo 2. Estructura de la tesis
Antecedentes y estado del arte	Capítulo 3. Antecedentes a la aplicación de los residuos de EPS conglomerados con yeso o escayola en la construcción
Preparación para la verificación de las hipótesis	Capítulo 4. Trabajos previos a la experimentación
Contraste con la realidad de las hipótesis	Capítulo 5. Experimentación para la selección de mezclas Capítulo 6. Ensayos físicos y mecánicos de las mezclas seleccionadas según dos propuestas de aplicación
Establecimiento de las conclusiones	Capítulo 7. Conclusiones

En esta tesis se estudia el reciclaje de residuos de EPS por medio de la integración de este plástico celular en placas y paneles para aplicaciones en la construcción.

El capítulo 3 describe las propiedades de interés de los plásticos usados en este sector (3.1) y de manera específica los del EPS (3.2) donde se detallan las aplicaciones generales (3.2.1) y los usos específicos en la construcción del poliestireno expandido (3.2.2).

Dos aplicaciones propuestas en esta tesis para las mezclas de residuos de espuma conglomeradas, son productos con una geometría similar pero con dimensiones y composiciones diferentes; ellas son por un lado los paneles para aislamiento térmico y por otro lado, las placas de yeso constructivas. Esto planteó la necesidad de investigar acerca del estado de la técnica de aplicaciones similares (3.3.1). Aquí se describen y analizan los tipos y formas de producción de paneles y placas de yeso y escayola sin residuos y que sirven de referencia para la evaluación de los materiales propuestos (3.3.3). Es de especial interés conocer los trabajos de otros investigadores sobre materiales análogos a los propuestos en esta tesis, por lo que se analizan las investigaciones recientes de estos materiales (3.4).

El capítulo 4 trata los trabajos preliminares de la experimentación. El manejo de mezclas de residuos de espuma y de conglomerantes de yeso y escayola planteó en sus inicios, dudas sustanciales acerca de sus comportamientos al momento de fabricar las muestras necesarias para la experimentación y de las formas con las que debían manejarse los residuos. Aquí se determinan algunas características de los residuos de EPS, como ha sido el corte en el caso de bloques de espuma (4.1.2) y el perfil de residuos molidos consistente en la caracterización de los tamaños de las perlas (4.1.3). También se describe (4.2) la actividad experimental preparatoria y que cooperó al diseño de la posterior etapa experimental. Se cierra el capítulo con las conclusiones del experimento realizado en esta etapa.

El capítulo 5 describe la primera etapa experimental que comprende un trabajo amplio de fabricación de numerosas mezclas de residuos de espuma conglomeradas con yeso o escayola (5.1). Para la interpretación de las fórmulas estudiadas durante la primera etapa experimental se ha desarrollado un sistema de nomenclatura propio de esta tesis, el cual se describe en el apartado 5.1.1.3.a. Las probetas fabricadas en esta etapa se sometieron a dos procesos de selección consecutivos (5.2) y que permitieron obtener un grupo de mezclas propias para la aplicación de **placa** y otro grupo para la aplicación de **panel**, cada grupo con un número de cuatro mezclas.

La segunda etapa experimental se desarrolla en el mismo capítulo 5. En este capítulo las mezclas seleccionadas en la etapa inmediata anterior se sometieron a una nueva fase de selección (5.2.2.2), que además de proporcionar información relativa a las mezclas, también facilitó la fabricación de las muestras y probetas a ensayar en la siguiente etapa.

El capítulo 6 trata los ensayos físicos y mecánicos aplicados a diferentes probetas según las dos propuestas de aplicación. En el apartado 6.1.3.1 se describe la forma de interpretación de las fórmulas usadas en este capítulo, debido a la presencia de nuevos elementos como las series de probetas y las probetas de referencia. Cada ensayo describe su procedimiento, expone sus resultados y ofrece un grupo de comentarios o análisis. Al final de cada grupo de ensayos se llega a las conclusiones relativas a cada aplicación propuesta.

Primero se describen los ensayos aplicados a las probetas de placa constructiva de yeso (6.2), después se agrupan los ensayos a probetas de panel aislante (6.3) donde cada ensayo comprende una descripción, una exposición de resultados seguidos de los análisis y conclusiones de los ensayos. La cantidad de resultados obtenidos de los ensayos relativos a las placas y paneles con residuos de EPS promueven la conveniencia de un análisis de conclusiones que permiten exponer de manera conjunta todos los datos obtenidos (6.4).

En el capítulo 7 se relacionan los resultados de los experimentos y las conclusiones parciales generadas en los capítulos anteriores para definir las conclusiones generales de la investigación.

Este documento de tesis contiene tres anexos impresos y un anexo en disco CD con información complementaria acerca de:

Anexo A1: El poliestireno expandido

Contiene conceptos fundamentales relativos a los procesos de obtención, transformación y propiedades del EPS.

Anexo A2: Perfil técnico del yeso

Contiene información sobre la obtención, tipos de yeso, el proceso de fraguado, composición de los yesos industriales y características de los yesos en general. El anexo concluye detallando las principales aplicaciones de los yesos y escayolas en la construcción.

Anexo A3: Avances para otras aplicaciones: Pastas

Este anexo está compuesto de una serie de reportes de los ensayos aplicados a mezclas de yeso o escayola con residuos de EPS con posibilidades de aplicación como aligerantes u otros usos en la construcción. El anexo tiene como objetivo mostrar otras posibilidades de las mezclas ensayadas, en aplicaciones diferentes a placas de yeso o paneles aislantes. Se plantea que esta información sea un avance de futuros proyectos.

Anexo A4: Información gráfica

El Anexo A4 presentado en un disco compacto que acompaña al documento de tesis contiene cuatro archivos con 340 fotografías relativas al proyecto y de los ensayos practicados que por tamaño y cantidad no es conveniente su impresión. Estos archivos contienen:

1. Fotografías de detalles de los residuos de EPS cortados en cubos y en tiras, así como los residuos molidos usados para la fabricación de las probetas de esta tesis.
2. Fotografías relativas a las probetas del proceso de elaboración de mezclas efectuado durante el capítulo 5.
3. Fotografías de las probetas de placa y panel seleccionados para los ensayos del capítulo 6.
4. Fotografías de los ensayos aplicados a placas y paneles durante toda la etapa experimental.

3

**ANTECEDENTES A LA
APLICACIÓN DE LOS RESIDUOS
DE EPS CONGLOMERADOS
CON YESO Y ESCAYOLA
EN LA CONSTRUCCIÓN**



3 ANTECEDENTES A LA APLICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE EPS CONGLOMERADOS CON YESO O ESCAYOLA EN LA CONSTRUCCIÓN

3.1 LOS PLÁSTICOS EN LA CONSTRUCCIÓN

3.1.1 PROPIEDADES DE INTERÉS DE LOS PLÁSTICOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Las obras de construcción con la mayor presencia de materiales plásticos son aquellas que se destinan a la vivienda; estas obras están constituidas por:

- Elementos primarios o estructurales
- Elementos secundarios como puertas y ventanas entre otros
- Los acabados interiores y exteriores
- Las instalaciones

En la industria moderna de la construcción en todos los elementos constructivos que se describen arriba, participan de alguna manera los materiales plásticos [GORD02]. Además los polímeros industriales también participan de forma importante en obras de ingeniería civil de gran tamaño.

Normalmente los materiales plásticos no se les usa como elementos primarios, pero cuando esta aplicación se llega a dar, generalmente se requiere reforzar a esos materiales con otros como metales y fibra de vidrio. En cambio, la aplicación de los plásticos en los elementos secundarios, en los acabados y en las instalaciones se da intensamente y de muy variadas formas. Las principales aplicaciones son:

- Aislantes térmicos y acústicos
- Cerramientos
- Compactación de suelos
- Componentes semiestructurales
- Impermeabilizantes y repelentes de agua
- Instalaciones para agua y electricidad
- Pinturas y recubrimientos
- Mobiliario urbano y doméstico
- Sistemas de anclado y fijación
- Sistemas de inyección y reparación de hormigones

La gran cantidad de aplicaciones de los plásticos en la construcción debe principalmente a la versatilidad de esos materiales. Entre otras de sus ventajas que los hacen muy apreciados en la industria encontramos su:

- Resistencia a los factores del medio
- Facilidad de procesado
- Facilidad de maquinado en obra
- Conductas de aislamiento eléctrico y térmico
- Baja densidad
- Poca demanda de mantenimiento

Por otro lado las desventajas de los plásticos son de forma general: su fácil deformación ante la aplicación de una fuerza comparada contra los metales y los minerales, su baja temperatura de reblandecimiento y sus coeficientes de dilatación que en ocasiones llegan a ser muy grandes, pueden ser un impedimento para la una aceptable estabilidad del elemento fabricado en plástico. Además la tendencia a reaccionar a la llama y a propagar el fuego en algunos materiales plásticos, también pueden ser argumentos en contra para su uso en ciertas construcciones. Últimos y decisivos factores son sin duda, los costes de los plásticos que usualmente son más elevados que los materiales de construcción convencionales [REYES02].

3.1.2 UTILIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Debido a las características expuestas en los párrafos anteriores, la industria de la construcción aplica materiales plásticos de manera intensa y diversa, que se refleja en el hecho que la industria haya consumido en Europa 7,35 millones de toneladas de plásticos en el año 2003 y que equivalen al 18,5% del consumo total en el Continente, lo que lo convierte el tercero en consumos del sector después de las aplicaciones de Envase y Embalaje (32,7%) y de los aparatos domésticos (20,1%) [APME05].

En España y dados sus consumos, el uso de los plásticos en la construcción representa un sector de notable importancia en la industria fabricante de esos materiales como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Distribución de los plásticos en la construcción por tipo

Plástico	Miles de toneladas	Porcentaje
PE alta, media y baja	71,5	13,5
PP	4,5	0,9
PVC	319,7	60,6
PS	41,4	7,8
Resinas urea-formaldehído	0,6	0,1
Poliésteres insaturados	37,2	7
PMMA	9,5	1,8
Poliuretanos	42	8

Fuente: Reyes, M. (2002) *Los plásticos como materiales de construcción*. Madrid: UNED. p: 20

De la tabla 3.1 podemos notar el amplio predominio del uso del PVC sobre otras resinas con más del 60,6% del total de consumos, seguido de lejos por el PE en sus distintas densidades con un 13,5%. Es conocido que PS y el PUR son resinas usadas para la fabricación de espumas destinadas a la construcción, si se suman sus dos consumos se obtiene que el grupo de espumas para construcción se colocaría en el segundo sitio con 15,8% arriba del PE pero aún lejos del PVC.

Tabla 3.2. Distribución de los plásticos en la construcción por uso

Uso del plástico	Miles de Toneladas	Porcentaje
Tuberías	333,1	63,1
Aislante PS	27	5,1
Aislante UF	0,6	0,1
Ventanas PVC	48,5	9,1
Suelos de PVC	0,5	0,1
Láminas de PVC	13,6	2,6
Cristales de PMMA	9,5	1,8
PUR	42	8
Forjados de EPS	14,4	2,7
Mangueras	4,8	0,9
Resina poliéster	32,4	6,2

Fuente: Reyes, M. (2002). *Los plásticos como materiales de construcción*. Madrid: UNED. p: 20

La tabla 3.2 nos permite observar el dominio de las aplicaciones de las tuberías con el 63,1% del total. Los principales materiales plásticos que se usan para la fabricación de tuberías son el PVC, LDPE, HDPE, y el PP. También se usan de manera puntual otras resinas para aplicaciones especiales como la resina poliéster reforzada y algunos copolímeros de estireno como el ABS.

Según la tabla 3.2 sumadas las cuatro aplicaciones de espumas de PS, PUR y Urea resultan en un 16,4% del total en peso para el sector, lo que vendría a ser el segundo sitio en importancia solo superados por los usos de tubería. Esto muestra la importancia relativa que tienen los usos de plásticos celulares con relación al consumo de otros plásticos en la construcción.

3.1.2.1 Espumas rígidas de plástico como elemento de construcción y aislantes

Cuando a las masas de plástico durante su proceso de fabricación se les adiciona con agentes hinchantes o de espumado, se obtienen productos de estructura celular con poros predominantemente cerrados, cuya densidad es necesariamente menor que los plásticos sólidos [KLEMP94]. La cantidad tamaño y organización de los poros de los cuerpos obtenidos puede variar de acuerdo del aditivo y procesos empleados:

- Las *espumas estructurales o espumas de piel integral* son materiales ligeros de construcción con una densidad alta comparada contra otras espumas la cual puede ir de 200 a 900 kg/m³.

- Las *espumas de núcleo o intermedias* también tienen diversas aplicaciones constructivas principalmente en elementos compuestos por las espumas y otros materiales que forman los paneles tipo sándwich, su densidad va de 50 a 200 kg/m³.
- Las *espumas ligeras* son materiales celulares poco aptas para soportar cargas ya que su volumen de poros usualmente va más allá del 90% y su densidad aparente puede ir de 15 a 65 kg/m³. Su aplicación principal se da en la fabricación de placas de aislamiento térmico y/o acústico.

3.1.2.1.a Espumas estructurales

En el paso de los plásticos sólidos a los plásticos espumados para usos estructurales en la construcción, se busca encontrar una relación óptima cuando el tamaño y la cantidad de poros presentes en el cuerpo celular aumentan hacia el interior de este cuerpo, a partir de una capa o piel externa comparativamente muy compacta con relación a las partes más profundas de la espuma, de tal manera que se produce una suave distribución de densidades. La distribución o combinación de tipo integral como la que se describe antes, la encontramos en los materiales naturales de construcción más ligeros como el bambú y en los materiales de origen artificial en los plásticos de espuma estructural o espuma integral [SAECH78].

Desde los años setentas, las espumas integrales de PUR en la construcción han tenido un papel importante en la fabricación de partes de mobiliario y de grandes piezas moldeadas para fachadas, donde además de sus características de resistencia y ligereza, se aprovechan sus propiedades de baja conductividad térmica y buena resistencia a los factores del medio. Por estas mismas razones las *espumas integrales* son muy comunes en la construcción de cámaras frigoríficas y se les usa también como elementos decorativos de interior, por ejemplo en vigas falsas o bien, en elementos de uso público que están expuestos a uso rudo o al vandalismo. Otros elementos fabricados de PUR son los aislantes para tubería y algunos tipos de marcos para ventanas de aplicación de exteriores, donde se les prefiere por su facilidad de acabado que es resistente y duradero.

Otra resinas que de forma especial se formulan y fabrican como espumas estructurales para su aplicación en la construcción son el PS y el PVC a las que se les usa como partes de ventanas, elementos secundarios para techo, claraboyas y sumideros, además de una amplia variedad de aplicaciones de aislamiento industrial para instalaciones de control de agua y cableado eléctrico.

3.1.2.1.b Las espumas de núcleo o intermedias

Las fachadas de los edificios modernos casi nunca tienen un misión de carga a cumplir. Los cerramientos ya no son gruesos muros, sino delgadas paredes y así la disminución de grosores en los materiales permite aligerar las cargas involucradas. La utilización de aislamientos adecuados compensa la falta de grosor en los cerramientos, de manera que esta pérdida no afecte a la confortabilidad de las construcciones.

Los cerramientos suelen realizarse con paneles o elementos modulares prefabricados, muchas veces en materiales plásticos tanto en sus núcleos como en sus recubrimientos protectores.

Desde los años sesentas las aplicaciones más comunes de las espumas de núcleo se dan en elementos de construcción para paredes y para cubiertas tipo sándwich en los que se combinan capas de materiales claramente diferentes a fin de proporcionar rigidez y resistencia con un peso y espesor mínimos, agregando además buen aislamiento y resistencia al desgaste [HUMMEL66] [FISHER66]. En los sándwiches de espuma empleados en la construcción, dos caras relativamente duras, rígidas, fuertes y delgadas están pegadas a un núcleo de espuma donde las caras actúan de manera similar a las alas de una viga de sección I y proporcionan

resistencia la flexión mientras que el núcleo atiene los esfuerzos cortantes estabilizando las caras contra el arrugado de tal manera que el conjunto ofrece una rigidez relativamente alta [DIETZ73].

El núcleo o alma del sándwich además de sus propiedades mecánicas proporciona aislamiento térmico y acústico. Generalmente los núcleos están formados por espumas de poliestireno expandido (EPS) o de espuma de poliuretano.

Las capas exteriores están destinadas a ser visibles y son el aspecto que presenta en sus caras el panel sándwich y en muchos diseños se busca que éstas proporcionen los medios para su ensamblaje con otro panel y que además aporten a la decoración del lugar de su instalación final. Entre los materiales empleados para revestimientos de los paneles tipo sándwich están los plásticos reforzados laminados a alta presión, algunos plásticos rígidos como la resina poliéster reforzada con fibra de vidrio, el PVC, los metacrilatos además de otros materiales como la lámina plástica, los laminados de melamina, madera contrachapada y de chapa de metal, esta última con intensa aplicación en fachadas, particiones y techos aligerados de recintos industriales y de uso agrícola.

3.1.2.1.c Las espumas ligeras

En el diseño y la construcción hay tres fenómenos ondulatorios de interés: el del sonido, el de las vibraciones y el de las ondas electromagnéticas (luz, calor, rayos ultravioletas, etc); el primer tema mide variaciones en la presión del aire, el otro deformaciones en un sólido y el tercero mide variaciones en un campo electromagnético y si bien estos fenómenos son muy diferentes en ciertos aspectos tienen un comportamiento similar. Con muy raras excepciones, la barrera que se opone a la penetración de las ondas térmicas, sirve también para detener en alguna medida a las ondas sonoras y esta doble propiedad se presenta en los materiales celulares de plástico usados en la construcción. En esta investigación solamente nos ocupamos de las espumas de plástico relacionadas con el aislamiento al frío y al calor es decir las espumas de aislamiento térmico.

Es común que se de cierta prioridad del aislamiento térmico sobre el del acústico debido a que mantener a una temperatura confortable un edificio, independientemente de las condiciones del exterior, exige un gasto que puede ser muy elevado, además del impacto al medioambiente que ello implica. Las técnicas constructivas de hoy muestran una tendencia constante hacia el aligeramiento de los elementos y de los cerramientos, lo que muchas veces repercute en el bienestar dentro de los edificios y que hace necesario recurrir a un aislamiento suplementario de esos elementos constructivos, sin afectar a la ligereza ganada [CUSA79]. De esta manera la construcción demanda materiales de gran ligereza y buenas características de aislamiento térmico y acústico. Las espumas rígidas de plásticos como las de PS, PUR, de PVC, de PP y las de UF (urea formaldehído) cumplen con esas condiciones dentro de los límites marcados por cada material.

Las dos principales aplicaciones de las espumas ligeras (con densidades aparentes comprendidas entre 15 y 65 kg/m³) se dan como elementos de aislamiento térmico y/o acústico y como piezas para forjados.

Los aislantes térmicos más usados en la construcción son las espumas de PUR y las de EPS. Aunque también se emplean las espumas de PVC, de PE y de Urea, todas ellas tienen un empleo mucho más restringido.

Los segmentos de mercado del EPS en España se mencionan en el capítulo 1, apartado 1.2.5.1. A continuación se describe las aplicaciones más importantes en la construcción de la espuma rígida de PUR y de la Urea formaldehído.

3.1.2.1.d Espuma rígida de PUR

Los PUR incluye una multitud de productos tanto sólidos como espumados y sus propiedades varían en un margen muy amplio, lo que los ha hecho muy populares en diversas industrias que requieren de materiales de aislamiento, como son la de fabricantes de aviones y de artículos deportivos además de la construcción.

El método más usado para la obtención de poliuretano es la reacción de un poliéter o poliéster hidroxiterminal (polioles) con di o poliisocianatos. Las propiedades de los PUR dependen del grado de entrecruzamiento, de su peso molecular, de las fuerzas intermoleculares de la rigidez de los segmentos de la cadena y de la cristalinidad de la estructura. Todas esas posibles variaciones permiten obtener poliuretanos de muy diferentes características y aplicaciones.

Los polioles son polímeros de cadenas cortas que aportan en sus terminaciones grupos OH. Se les denomina polioles por su carácter de polímero corto. Los isocianatos más usados en la fabricación de poliuretano son los basados en isocianatos aromáticos y los isocianatos alifáticos. Los isocianatos aromáticos muestran una tendencia notable a tomar un color amarillo cuando son expuestos a la luz solar por lo cual se les aplica en mezclas destinadas a usos de interiores. Los isocianatos alifáticos en cambio son más resistentes a esos efectos solares indeseados.

La reacción de los diisocianatos con polioles para la formación de poliuretanos está catalizada tanto por ácidos como por bases orgánicas. La selección del catalizador a usar en la producción es de gran importancia ya que el catalizador afecta no sólo la velocidad de reacción de propagación y al grado de entrecruzamiento, sino también a las propiedades finales de la espuma al propiciar una reacción con una formación celular completa.

Entre los motivos para su importancia en la industria de la construcción encontramos con uno que lo distingue, y es que esta espuma permite moldear productos que después de fabricarse se pueden maquinar de forma similar a la madera, lo que permite a las espumas adaptarse fácilmente a cualquier forma del edificio. Estas cualidades, además de sus magníficas prestaciones como aislante, se aprovechan para solucionar problemas de aislamiento que se dan frecuentemente en las construcciones.

La espuma de PUR usada en la construcción se obtiene a través de dos técnicas. La primera técnica consiste en espumar grandes bloques en la fábrica, que resultan de mezclar sus componentes líquidos o reactantes en procesos y que dependiendo de los equipos pueden ser continuos o discontinuos. Una vez endurecida la espuma los bloques son seccionados según las necesidades del constructor [GONZA01]. Los cortes con forma de planchas suelen aplicarse en obra directamente sobre la superficie a aislar, como son techos, paredes de doble panel, en el interior de paredes simples de mampostería, cielo raso y suelos radiantes.

La segunda técnica, consiste en producir de forma continua en máquinas de doble cinta transportadora, planchas para paredes y techos de PUR. Las planchas de espuma se fabrican forradas por ambas caras con bandas untadas de betún o con papel aluminio; los dos acabados sirven como barreras de vapor o de sellado de las cubiertas.

Las espumas de PUR expandidas con hidrocarburos fluorclorados (cada vez más escasos debido a las restricciones medioambientales) poseen un reducido coeficiente de conductividad térmica (λ) alrededor de 0,018 kcal/mhK que permanece invariable por mucho tiempo en los elementos con capas de coberturas herméticas al gas. Para espuma de PUR sin las capas protectoras se ha determinado un valor final (λ) de 0,022 kcal/mhK tras cinco años de difusión.

Por otro lado las piezas procedentes del seccionado de los grandes bloques de PUR pueden conducirse a otros procedimientos de maquinado para obtener piezas con la forma deseada.

La espuma de PUR también se pueden formar en el lugar mismo de la obra mediante un equipo para esos fines, el cual mezcla y los proyecta a presión hacia el espacio a rellenar o recubrir donde termina la reacción.

El método de proyección es muy popular en la construcción y su aplicación común es la de producir un aislante y aunque sus propiedades finales dependen de su densidad (que comúnmente se sitúa entre los 35 – 45 kg/m³), las principales razones para su uso son :

- Excelente adherencia lo que le permite formar elementos estructurados sobre casi cualquier forma y sin juntas.
- Puede aplicarse de forma continua adoptando el perfil de la superficie a aislar, lo que favorece la ausencia de puentes térmicos.
- Por su estructura cerrada casi muestra casi absoluta impermeabilidad.
- La espuma no se ve afectada por el agua de mar, hidrocarburos asfálticos, aceites minerales y aceites alcalinos, petróleos ligeros, carburantes ni gases industriales.
- Las células del núcleo contienen gases (comúnmente pentano) atrapados y que tienen una conductividad térmica menor que la del aire, lo que parece favorecer sus cualidades como material de aislamiento térmico [KLEMP94].

Como se ha señalado, la espuma de PUR es un material que de forma unificada participa en el aislamiento térmico y acústico de un edificio, así como también al mismo tiempo coopera a su impermeabilización.

La característica del PUR de nuestro mayor interés es su capacidad de aislamiento superior incluso a la del EPS. Con un coeficiente (λ) alrededor de 0,022 kcal/hm °C (0,026 W/mK) la comparación de este material contra otros materiales típicos de construcción es siempre ventajosa para la espuma y que ilustra la tabla 3.3 [CUSA79].

La tabla 3.3 muestra como ejemplo el aislamiento que ofrece una capa de 1 cm de espesor y los espesores de otros materiales necesarios para proporcionar el mismo aislamiento [CUSA79]:

Tabla 3.3 Equivalencias en capacidad de aislamiento entre el PUR y otros materiales tradicionales en la construcción.

Material	Espesor en cm
PUR	1
EPS	1,4 a 1,8
Corcho	2
Plancha de fibra de madera	4
Muro de ladrillo estándar	12 a 25
Madera	5 a 8
Hormigón	40 a 60

El factor de resistencia a la difusión de vapor de agua del PUR proyectado es similar con relación a otras espumas comunes la construcción como la de EPS. Por otro lado el peso del EPS es inferior al PUR que muestra una densidad que oscila entre los 40 – 80 kg/m³ mientras

que para el expandido, ésta (ρ) usualmente se encuentra entre 15-35 kg/m³ para aplicaciones parecidas.

Finalmente aunque los usos del PUR en la construcción son muy variados se pueden resumir así:

- Aislamiento de techos
- Aislamiento de paredes exteriores
- Aislamiento de zonas interiores específicas como son los baños
- Aislamiento e impermeabilización de sótanos
- Aislamiento en encofrados
- Aislamientos industriales

3.1.2.1.e Espuma rígida de Urea Formaldehído (UF)

Esta espuma generalmente se deposita por proyección sobre o dentro los elementos constructivos por aislar. La técnica es muy parecida a la que hemos descrito para el PUR, esto es, una máquina de diseño especial que conduce soluciones acuosas de un precondensado de urea-formaldehído y catalizador; a la mezcla también se le agregan diversos aditivos según las características del producto deseado y se le proyecta por medio de una manguera con boquilla a una presión cercana a las dos atmósferas. Una vez depositada, la espuma termina su desarrollo y endurecido en el mismo lugar de aplicación.

Por su baja densidad de 10 kg/m³ la espuma de UF solo se puede usar para capas aislantes no sometidas a esfuerzos ya que es muy quebradiza. La aplicación de espuma UF esta especialmente indicada para depositarse entre muros preparados con cámara de aire intermedia.

La espuma de UF es absorbente del sonido, resistente a las vibraciones, envejecimiento, cambios de temperatura y calor y ofrece ventajas para la protección durante incendios ya que apenas se inflama y es autoextinguible.

3.1.2.1.f Espuma rígida de poliisocianurato (PIR)

Es muy similar a la espuma de PUR, se puede elaborar en proceso semejante para fabricar elementos tipo panel con o sin cobertura. Con los aditivos indicados se puede obtener espuma rígida sin cobertura de tipo normal. La espuma rígida de PIR se puede considerar difícilmente inflamable y ahí su atractivo para la construcción, ya que puede resistir el calor a largo plazo hasta los 140 °C sin perjudicar otras de sus propiedades.

3.1.2.1.g Espuma rígida de carbonamida (PCD)

Las espumas de PCD se fabrican en grandes bloques por una policondensación especialmente catalizada de isocianato donde hay desprendimiento de CO₂. Estas espumas son difícilmente inflamables sin la necesidad de adicionarse con aditivos. Son resistentes al calor y carbonizan con poca producción de humos cuando se les somete a la acción de la llama.

Estas espumas tienen una densidad que va de 16 a 19 kg/m³ y a diferencia de las espumas rígidas que se han descrito antes, las espumas de PCD muestran una estructura celular de poros abiertos. Sus valores de (λ) van de 0,027 a 0,035 kcal/mhK y sus propiedades de absorción del sonido son favorables.

La aplicación de estos materiales celulares se hace por medio de planchas cortadas de grandes bloques y se usan en aislamiento térmico de paredes dobles y fachadas con cámara de aire en edificios, aislamiento térmico y acústico en instalaciones de climatización. Estas espumas se acondicionan por laminado para ser instaladas bajo pavimentos flotantes y disminuir el ruido de pisadas [GNAUC92].

3.1.2.1.h Espumas de resina fenólica

Las espumas se obtienen de manera muy semejante a las formas de fabricación de PUR pero son rígidas, quebradizas y tienden al desprendimiento de polvos por lo cual se les adiciona con capas de cobertura.

Estos materiales son estables a temperaturas permanentes de hasta 130 °C sin disminuir su resistencia, son difícilmente inflamables y autoextinguibles, así también muestran especial resistencia a la mayoría de los disolventes orgánicos y soluciones bituminosas.

Sus campos de aplicación son especiales que son el aislamiento térmico de piezas expuestas al calor como canales de calefacción industriales [MODER02].

3.2 EL EPS EN LA CONSTRUCCIÓN

Como se describe en el Anexo A 1 los antecedentes históricos del EPS están ligados a los de la resina de PS, cuyas primeras noticias datan de 1911 y que mencionaban un atractivo nuevo material que sin embargo en ese momento resultó demasiado quebradizo, lo que dificultó su comercialización. Las mejoras del material que lograron por separado la Bakelite Corporation y Dow Chemical Co. permitieron la presentación de la primera patente de resina de poliestireno en 1935. En 1941 la Dow Chemical Co. comenzó sus investigaciones para el desarrollo del poliestireno celular, que poco tiempo después apareció en el mercado con el nombre comercial de STYROFOAM® que fue usado por el ejército norteamericano durante la segunda guerra como material de flotación. Después del conflicto armado se desarrollaron nuevas técnicas de producción para la espuma y novedosas aplicaciones en varios campos, entre ellos el de la construcción, que con el tiempo se ha convertido en uno de sus principales consumidores.

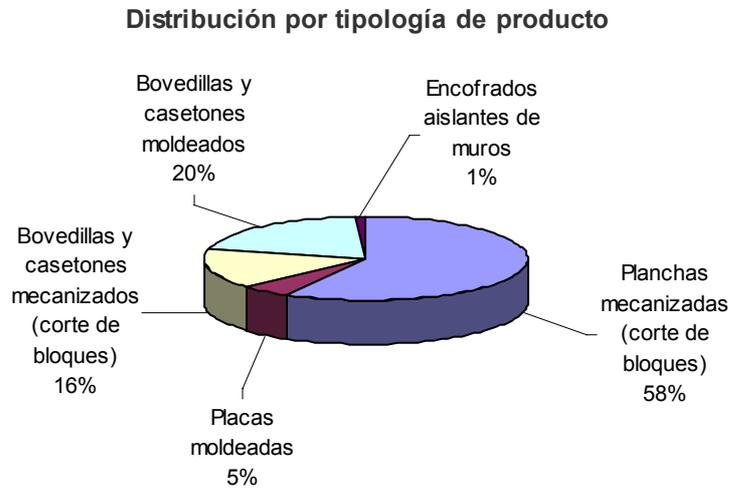
3.2.1 APLICACIONES GENERALES DEL EPS

Las aplicaciones generales del EPS se pueden agrupar así:

- Aplicaciones en la Construcción
- Aplicaciones de envase y embalaje
- Aplicaciones varias

Del capítulo 1, apartado 1.2.5, podemos conocer la distribución en destinos de aplicación del EPS en Europa y en España, donde los usos de esa espuma en la construcción forman el porcentaje más alto con el 57,8% del total con notoria ventaja, sobre el 39,7% que corresponde a envases y embalajes y al 2,5% de otras aplicaciones.

En base a sus aplicaciones los tipos de productos de EPS para la construcción se distribuyeron como se muestra en la gráfica 3.1.



Gráfica 3.1 Usos del EPS en la construcción en España. 2003

Fuente: López, C. (2004). El EPS en la construcción. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid: CSIC. 28(572):126.

De la gráfica 3.1 podemos señalar que los usos del EPS en la construcción básicamente se agrupan en tres grandes áreas:

- En el aislamiento térmico-acústico
- En la fabricación de elementos constructivos y formación de estructuras en obra
- En obras de Ingeniería civil

3.2.2 USO DEL EPS COMO AISLANTE TÉRMICO-ACÚSTICO EN LA CONSTRUCCIÓN

Las espumas rígidas de EPS que se usan como material para aislamiento térmico-acústico se comercializan como planchas y toman diversos nombres según el fabricante que haya expandido las perlas y su proceso de fabricación, que se describe en el anexo A 1.

Las planchas de EPS usadas en la construcción son muy apreciadas por diversas causas, entre las que encontramos sus características de reacción al fuego, ya que siendo de difícil inflamabilidad inclusive pueden formularse para ser autoextinguibles. Otras razones son su notable estabilidad frente a los materiales tradicionales de construcción como el cemento, la cal, el yeso; no es atacada por morteros y hormigones, además de la baja densidad aparente del EPS y su facilidad de maquinado que muestra en obra. Las planchas de EPS pueden pegarse con adhesivos de dispersión, adhesivos de resina reactiva y betún caliente hasta los 80 °C, sin embargo, se ven atacadas por la mayor parte de adhesivos que contienen disolventes, pinturas y productos para la madera con disolventes o aceites como los productos adhesivos a base de alquitrán (ver anexo, apartado A1.4.2).

Su empleo como material aislante en la construcción, permite proponer soluciones viables para casi todas las exigencias de aislamiento térmico dentro de un amplio campo acotado por un rango de temperaturas entre -150 y los 90 °C.

Las prestaciones de aislamiento del EPS superan a muchos de los materiales comunes en la construcción. La tabla 3.4 muestra las equivalencias necesarias con otros materiales para obtener aproximadamente el mismo aislamiento térmico del EPS [CUSA79].

Tabla 3.4 Equivalencias en conductividad térmica del EPS con respecto a materiales tradicionales de construcción.

Material	$\lambda = W/mK$	Espesor (unidades)
EPS (densidad 30 kg/m ³)	0,024	1
Lana de vidrio	0,036	1,5
Corcho aglomerado	0,042	1,75
Vermiculita	0,050	2,08
Hormigón poroso	0,092	3,83
Hormigón pómez	0,25	10,40
Ladrillos huecos	0,35	14,58
Ladrillos sólidos	0,75	31,25
Hormigón	1,20	60
Muros de granito	1,6	67
Muros en piedra caliza	1,7	71
Basalto y granito	3	125

3.2.2.1 Aislamiento térmico-acústico con planchas de EPS en muros

El uso de EPS en planchas se puede dar de tres maneras:

- Aislamiento exterior
- Aislamiento interior
- Aislamiento intermedio

3.2.2.1.a Aislamiento exterior con planchas de EPS

Al envolver el edificio por su cara externa con planchas de EPS, este se verá protegido por una capa aislante. Este sistema se practica desde hace tiempo en países como Alemania, Francia y Suiza. En España su aparición es más reciente [SANT87]. El aislamiento de fachadas se muestra primordial, ya que ahí se puede llegar a perder más del 20% de la energía que se demanda para calentar o enfriar un edificio [ESPE02].

El aislamiento por medio del tratamiento de las caras exteriores de la construcción forma una capa que protege a la edificación contra las cargas térmicas. En el aislamiento exterior, la superficie del edificio se recubre con planchas de EPS que se adhieren a las paredes mediante masas adhesivas, entre las cuales la más común es el betún caliente. Una vez que la espuma se encuentra bien unida a la superficie de la construcción y ha secado el adhesivo usado, se pueden dar a las planchas prácticamente cualquier revoque, enlucido o acabado convencional.

3.2.2.1.b Aislamiento interior con planchas de EPS

Esta forma de aplicación de la espuma de EPS en planchas se practica cuando se desea acondicionar térmicamente una construcción en el menor tiempo posible. En el aislamiento interior, las planchas de EPS son colocadas sobre las paredes con el mismo método usado para el aislamiento exterior; después de terminado el revestimiento se procede a un acabado común, esto siempre que no se fijen las planchas de EPS mecánicamente a preparaciones de madera o metal sujetas a la pared, como sería el caso de un producto combinado EPS-placa de yeso que permite ahorrar el revoque y facilita el acabado.

Es común en esta forma de aislamiento encontrar productos que involucran simultáneamente a la plancha de EPS con otros paneles, formando un producto único a manera de un panel sándwich, donde la cara visible de la espuma está recubierta con láminas decorativas, chapas de madera, chapas metálicas e inclusive paneles cerámicos. En otros productos ambas caras se encuentran recubiertas por acabados funcionales o decorativos y que permiten formar un tabique ligero aislante. Algunos productos decorados por sus características se pueden aplicar tanto para aislamientos exteriores como los aislamientos interiores.

3.2.2.1.c Aislamiento intermedio con planchas de EPS

Este tipo de aislamiento que también se le denomina aislamiento central o aislamiento sándwich, es una solución constructiva adecuada en los casos donde la humedad relativa del local a proteger es moderada.

La solución comprende la colocación de un elemento aislante de espuma de EPS, en este caso, entre dos paramentos. Esta propuesta es de especial interés en arquitecturas con diseño de paredes con *cámara de aire* comunes en España, a la cual puede sustituir o complementar la presencia de la espuma de EPS.

Las paredes que forman un aislamiento intermedio pueden constituirse con todos los tipos de ladrillos macizos, huecos, etc. También se manejan soluciones constructivas menos conocidas como los tabiques ligeros de yeso tipo sándwich, donde las paredes están compuestas por dos paneles de yeso gruesos con una capa intermedia de espuma de EPS.

3.2.2.2 Aislamiento térmico con EPS en techos

3.2.2.2.a Aislamiento de cubiertas

La superficie de las cubiertas de los edificios puede representar un porcentaje muy elevado con relación al total de los mismos y se deben hacer aplicaciones aislantes para evitar pérdidas de energía.

El aislamiento térmico con EPS se puede aplicar en cubiertas planas y en cubiertas inclinadas. Las cubiertas inclinadas son aún de gran popularidad en España, aunque las cubiertas planas son ahora muy usuales ya que son éstas las que se diseñan para bloques de pisos.

Son dos las variantes que pueden presentarse dentro del grupo de las cubiertas planas y donde puede participar la espuma de EPS; las variantes son:

- Cubierta plana sencilla o de techo caliente
- Cubierta plana de techo frío

La cubierta de *techo caliente* es una cubierta cuyo nombre se refiere a que sus capas componentes (capa portante, capa de pendientes, capa de aislantes y capa de impermeabilización) se encuentran sucesivamente una sobre la otra sin dejar ningún espacio entre ellas para su ventilación.

En esta forma de aislamiento sobre las cubiertas sencillas, se pegan planchas de EPS sobre una capa de impermeabilizante usando betún caliente o algún adhesivo compatible con el plástico. Las planchas pueden ser de EPS convencional y cuya densidad depende de los usos de la cubierta; si sobre ella habrá algún tipo de tránsito, usualmente la densidad de las espumas usadas va de los 20 a los 25 kg/m³. Existen en el mercado un sinnúmero de productos que agilizan el proceso mediante el uso de planchas preparadas de antemano, con diseños que permiten un rápido ajuste entre planchas y con capas de asfalto o algún impermeabilizante en una o ambas caras.

La cubierta de *techo frío* es aquella en que sus constituyentes la capa de aislamiento y la capa de protección se encuentran separadas por un hueco de ventilación a través del cual circula aire comunicado al exterior.

Dado que en este tipo de construcciones normalmente no hay tránsito sobre la espuma se puede usar una densidad menor del plástico que aquella aplicada para el techo caliente. La densidad de la espuma puede ser entre 12 y 15 kg/m³ donde el plástico se fija sobre la capa de protección y bajo la capa de aislamiento con los adhesivos que se han mencionado en párrafos anteriores.

3.2.2.2.b Paneles de EPS en el revestimiento de techos

Las espumas que participan en el recubrimiento de techos para mejorar al aislamiento del edificio y para fines de decoración, se distinguen dos grupos:

- Espumas para revestimiento directo
- Espumas para la realización de cielos rasos

En la fabricación de cielos rasos o falso plafón no participan las espumas de EPS, sino que se usan paneles extruídos de PS recubiertos con algún acabado, debido a sus mejores características de aislamiento acústico y a que por las características de diseño de los techos falsos resultan más peligrosos en zonas de potencial incendio y por ello no se describen aquí.

3.2.2.2.c EPS en techos como revestimiento directo y molduras

Estos revestimientos son los más sencillos de realizar y también son los más económicos ya que se aplican directamente sobre el interior del techo, al cual se adhieren las placas mediante pegamentos generalmente de caucho sin disolventes y por lo tanto sólo requieren que la superficie este lisa y limpia.

Para el revestimiento del techo se usan placas estándar de 50 x 50 cm con espesores entre 8 y 15 mm y que se han fabricado con motivos de decoración especiales de cada marca. Las placas se fabrican (marcas Poresta® y Decorsol®) aditivadas contra incendios y en densidades de espumas muy bajas (12-15 kg/m³) por lo cual su carga es inapreciable y que se suma a las ventajas ya descritas del EPS de usos en la construcción.

Otra aplicación parecida relacionada con el revestimiento de techos, es la de molduras o plafones para techos fabricados en EPS. Éstas permiten decorar o rematar las zonas donde no ha sido posible o no es deseable decorar con las placas de revestimiento. Se aprovecha una

enorme cantidad de diseños disponibles en el mercado y la facilidad de maquinado del EPS para cumplir con las medidas del techo, ya sea a través de la sucesiva adición de varias tiras o recortando los sobrantes de las espumas. Para la fijación de las molduras se aplican los mismos adhesivos empleados para las placas de revestimiento.

3.2.2.3 EPS en aislamiento de suelos

Las pérdidas de energía a través de los suelos de las construcciones pueden disminuir la confortabilidad de una construcción y provocar altos costes de mantenimiento si los recintos gozan de algún tipo de calefacción.

El EPS supone una excelente barrera para aislar el suelo del edificio cooperando a evitar las pérdidas de calor por conducción, en especial en los sótanos de las construcciones. Además la colocación de paneles o placas de espuma de EPS pueden simplificar sensiblemente los trabajos de aplanado y acondicionamiento del suelo. En plantas superiores, además de los conocidos beneficios del material como aislante térmico, el EPS elastificado o plastificado con una rigidez menor que la espuma típica, tiene buenas prestaciones como material de aislante acústico en especial ante pisadas.

El EPS puede usarse como una base para aislamiento de *suelo radiante* para lo cual se comercializan diseños especiales para ese fin. El suelo radiante es una red de tuberías por la cual circula un fluido caliente, de tal manera que el sitio se calienta de abajo hacia arriba [SANT87].

3.2.2.4 EPS en la fabricación de elementos constructivos y formación de estructuras en obra

3.2.2.4.a Ladrillos celulares

En el ladrillo tradicional, para mejorar su escaso poder de aislamiento térmico y de reducir a un mismo tiempo su densidad, se han desarrollado productos con diversos diseños que se denominan ladrillos celulares o ladrillos aligerados. Una forma de promover los huecos dentro del ladrillo ha sido la incorporación de poros de aire, a lo que han cooperado las perlas preexpandidas de EPS, que se agregan a la masa de arcilla en estado plástico. Durante la cocción del ladrillo, las perlas de plástico sufren una gasificación total y dejan una estructura celular formada por poros esféricos cerrados y repartidos por todo el cuerpo del ladrillo. Las características resultantes del elemento que resulta del agregado de espuma, buscan responder a las siguientes necesidades de la construcción:

- Baja densidad
- Elevada resistencia a la compresión
- Excelente poder de aislamiento térmico
- Facilidad de elaboración
- Simplicidad en su manipulado

3.2.2.4.b Encofrados perdidos

En las obras de construcción donde intervienen elementos a base de hormigón en masa o armado, el encofrado representa una parte importante del costo general del trabajo. Ha sido una preocupación constante de los investigadores el desarrollar sistemas que permitan agilizar la instalación del encofrado, a través del diseño de paneles prefabricados que permitan acortar los plazos de fabricación y la necesidad de mano de obra especializada.

Uno de los paneles para encofrados con más éxito han sido aquellos fabricados con EPS, ya que se parte de que es un material ligero, muy manejable en la obra y que puede adaptarse con facilidad a las características del diseño constructivo que se trate. En este caso se trata de encofrados perdidos, ya que no son recuperables después del fraguado del hormigón.

Los diseñadores buscan lograr el aislamiento completo de los muros de hormigón armado con relación a la superficie que lo soporta, con el fin de obtener la mejor resistencia a la transmisión térmica y para ello se han aplicado diversas variaciones de espuma de EPS, que se integran íntimamente a las caras del encofrado. Se han usado como paneles de encofrado plano las simples planchas lisas de EPS, sin embargo son de especial interés aquellos sistemas que parten de usar planchas de EPS y que están recubiertas en sus dos caras con láminas de otros materiales aislantes como molidos o viruta de madera (sistema *Isotex*); esto permite obtener planchas que servirán en este caso como un medio aislante y un encofrado plano perdido.

Otros sistemas de encofrado se denominan *encofrados aislantes moldeados* (sistema *Iglú*) que parten de la fabricación de piezas con diseños especiales y moldeadas con perlas de EPS. Estos encofrados se ofrecen con una gran variedad de diseños que se asemejan a cajones, que generalmente tienen paredes de espuma que envuelven huecos donde se reciben el hormigón y los preparados metálicos de refuerzo, si estos últimos son necesarios. Los sistemas de encofrados moldeados de EPS ofrecen una gran cantidad de posibilidades constructivas a través partes especiales para la formación de esquinas y de colocación de otros elementos como puertas y ventanas. Los fabricantes señalan que estos sistemas son especialmente indicados para construcciones de viviendas, paredes de piscinas y paredes industriales donde se sustituyen a los elementos prefabricados de hormigón.

3.2.2.4.c Piezas moldeadas para la obtención de forjados aligerados

El forjado reticular permite una importante economía de tiempo y costos de obra debido principalmente al ahorro de hormigón y de acero que representa la reducción en el peso de los forjados.

La aportación de los plásticos a la obtención de forjados reticulares ha sido por medio de los llamados *casetones*, hechos de piezas moldeadas en varias resinas con y sin refuerzos. Los casetones de plásticos permiten sustituir otros materiales antes usados para la obtención de los forjados como las chapas de maderas o de metales o paneles de fibra de madera. Hay dos tipos de casetones; aquellos que se pueden retirar al terminar el forjado y, los casetones que se quedan incorporados permanentemente a manera de bovedilla; a estos últimos se les denomina encofrados perdidos para forjados reticulares y muchas veces están fabricados en espuma de EPS.

Otra técnica para moldear hormigón y prevenir deformaciones de las partes de plástico, es la adaptación de espumados de EPS dentro los casetones recuperables. Los casetones de moldeo sándwich están fabricados con paneles cuyas caras externas son de polipropileno y el núcleo interno generalmente de EPS. Para asegurar la recuperación de los casetones sándwich se les protege con un envoltura de LDPE que los separa de la masa de hormigón y favorece su desmolde.

3.2.2.4.d Bloques ligeros para encofrados perdidos

En esta técnica para la obtención de encofrados, las piezas de plástico cumplen una doble función al conformar al encofrado y ser una capa aislante térmico y acústica dentro del encofrado endurecido. Ahora a diferencia de los casetones, los bloques ligeros para encofrados perdidos no son huecos sino sólidos de espuma que quedan integrados de manera permanente en el encofrado cuando éste ha endurecido. La mayoría los moldeados de EPS empleados en la técnica que se describe son rectangulares y son más largos que los casetones lo que permite colocarlos rápidamente (técnica *techo pan*).

Esta forma de moldear encofrados permite una notable reducción del peso propio del forjado y que puede llegar a reducirse hasta un 50% aproximadamente, a lo que se suma su gran poder de aislamiento acústico.

3.2.2.4.e Moldes para prefabricados de hormigón que no son recuperables

Cuando un elemento constructivo prefabricado representa una alta dificultad y la realización del mismo resulta que no es rentable a través de moldes permanentes convencionales, o si no es posible moldearlo por las técnicas usuales, una opción es moldearlos en cavidades formadas por espuma de EPS. Una vez extraído el prefabricado del molde de EPS y si no se puede evitar, el molde se dispone para los residuos o para su reciclado.

3.2.2.4.f Modelado de paneles decorativos

Es una técnica que aprovecha tres de las principales características de la espuma de EPS: su ligereza, facilidad de manipulación y su versatilidad. La técnica consiste en la elaboración de paneles decorativos de hormigón u otro material para la ornamentación de fachadas y grandes espacios. Para esto, los encofrados deben fabricarse para el moldeo de los motivos artísticos donde la espuma es cortada según el diseño y armada sobre un panel en negativo del diseño a reproducir. Una vez terminado el encofrado es sujeto a los elementos estructurales que lo retendrán mientras se hace el vaciado del hormigón o el material a usar en el motivo artístico.

3.2.2.4.g Hormigón aligerado con perlas preexpandidas de poliestireno

Esta aplicación de poliestireno se da con perlas preexpandidas de PS y se aplica como aditivo para la formación de hormigones aligerados. El material ligero que resulta es diferente de otros hormigones ligeros, ya que el aire no tienen que ser inyectado sino que se integra a través de las perlas preexpandidas. La forma esférica propia de estas partículas de plástico resulta muy ventajosa para integrar de forma rápida y homogénea la estructura de un hormigón ligero de tipo celular. En torno a cada perla se constituye una cubierta de cemento con notables propiedades mecánicas.

Las posibilidades de aplicación de estos hormigones aligerados es muy amplia: como hormigón aislante en cimentaciones, firmes de carreteras contra heladas, construcción de vasos para piscinas, prefabricados de grandes dimensiones y morteros de gran ligereza.

3.2.2.4.h Hormigón aligerado con perlas de EPS

Este hormigón ligero de EPS es un material que se obtiene de mezclar cemento con esferas de EPS de 1,5 a 2,5 cm de \varnothing y con una densidad aparente muy baja (aproximadamente 12 kg/m^3) en la que se usa un aditivo auxiliar de adherencia, que resulta importante sobre todo para hormigones aligerados de muy baja densidad (proceso KAWE).

El hormigón ligero de EPS se puede preparar de forma tradicional o puede mezclarse y bombearse. Un elemento a considerar es que al aplicar el vibrador dentro de la masa, la carga de plástico puede desplazarse hacia arriba, por lo tanto, cuando se trabaja una masa de hormigón de muy baja densidad ($200 - 500 \text{ kg/m}^3$) ha de prepararse a presión únicamente.

Los campos de aplicación de los hormigones aligerados con esferas de EPS son muy especializados: cimientos y revestimientos aislantes para grandes tanques de almacenaje de gases licuados ($-32 \text{ }^\circ\text{C}$), placas de paredes industriales de gran formato, bovedillas para techos y piezas de encofrado para protección térmica completa [SAECH78].

3.2.2.5 Aplicaciones del EPS en obras de Ingeniería civil

Las propiedades mecánicas y térmicas de la espuma de EPS también son atractivas para las obras de gran tamaño y de altas prestaciones como son las construcciones de carreteras. El EPS se aplica una capa de 15 cm de un hormigón con agregados de EPS y con densidad cercana a los 500 kg/m^3 en carriles de carretera, sobre los cuales se coloca planchas prefabricadas de hormigón pretensado. Esta tipo aplicación permite disminuir las vibraciones propias del rodado de vehículos y coopera a disminuir la congelación de la vía durante los meses del invierno en zonas montañosas y con ello también a disminuir los problemas asociados al deshielo.

También en zonas donde el terreno es muy blando o hay un manto acuífero próximo a la superficie, casi siempre es necesario elevar el terreno para prepararlo para diversas construcciones. Esta operación generalmente se hace aportando grandes cantidades de arena lo cual puede resultar en un impacto medioambiental considerable además puede encarecer los costes de la obra y afectar los plazos de ejecución, ya que generalmente la arena tiende a asentarse.

Atendiendo al problema anterior, la elevación y el nivelado de la superficie se practica en ocasiones con la aportación de grande bloque de EPS a manera de un material de cimentación ligero y participa en varias soluciones de interés para la construcción [HORC05] como:

- Construcción de carreteras libres de asentamientos
- Elevación de campos deportivos, parques y zonas de césped
- Elevación segura sobre otras instalaciones ya existentes como ductos para la conducción de diversos fluidos
- Reducción de carga mediante el refuerzo de pasos elevados con rampas
- Elevaciones para las barreras de ruido
- Cimentaciones de cobertizos o edificios ligeros
- Pavimentos de patios y parcelas
- Terrenos y pisos industriales

3.3 ELEMENTOS DE YESO Y ESCAYOLA PARA LA CONSTRUCCIÓN

Los elementos fabricados de yeso y escayola para los fines de esta investigación se clasifican de la siguiente manera:

- Paneles para tabiques
- Placas y complementos para techos
- Placas de yeso laminado

A continuación se describen las principales características de estos elementos y la normativa involucrada en su producción y uso.

3.3.1 PANELES DE YESO PARA TABIQUES

Los paneles de yeso o escayola para la fabricación de tabiques son unos de los mejores soportes para el revoque y los más antiguos elementos constructivos prefabricados de yeso [LADE60] con forma de paralelepípedo y con un espesor superior a los 5 cm. Estos cuerpos se destinan a la elaboración de particiones interiores sin carga en interiores de edificios o a la fabricación de barreras en zonas de alto riesgo de incendios o para otras funciones de señalamiento de perímetros y otras protecciones. Los paneles están unidos entre sí por medio de mezclas preparadas en la misma obra y con una composición similar a la de los paneles, aunque también se dispone de adhesivos especiales preparados en base a yeso o escayola, pero mejorados con aditivos que dan las características deseadas de color, tiempo de fraguado y fuerza de la unión, entre otras. Con el uso de paneles de yeso el revoque sólo tiene la misión de ofrecer en las paredes una superficie lisa y uniforme.

Los paneles para tabiquería son elementos constructivos prefabricados a partir de yeso o escayola de alta pureza en maquinaria especial y en plantas por lo general alejadas de la obra. Los elementos usualmente están formulados con aditivos diversos y la presencia de adiciones inorgánicas ligeras y de fibras minerales como la fibra de vidrio.

Para la fabricación de tabiques de yeso en España coexisten industrias de diversos tamaños y niveles tecnológicos. En las empresas más pequeñas los procesos de producción se realizan con procesos poco asistidos por maquinaria. Las técnicas más comunes de producción de tabiques de yeso se basan en instalaciones de mesa rotatoria para fabricación continua, estas instalaciones presentan las siguientes etapas del proceso [DOCHA84]:

- Dosificación y amasado

Por medios mecánicos se alimentan en cantidades precisas, el yeso o escayola, los aditivos, los agregados y el agua que participará en la preparación de la masa.

- Amasadora

Los materiales son conducidos para ser amasados mecánicamente dentro de un contenedor por medio de ejes con paletas, que giran con la rapidez necesaria hasta lograr una masa homogénea y con la viscosidad adecuada al sistema y al tipo de panel a producir.

- Alimentación de moldes

En esta etapa una cantidad precisa de masa de yeso o escayola se deposita en cada molde siguiendo el movimiento constante de la mesa rotatoria.

Los moldes pueden ser individuales o con varias cavidades. Se han encontrado noticias de cajas de moldeo patentados que proceden hasta del año 1912 que buscan ofrecer la resistencia que demanda el desmolde mecánico y un acabado terso del producto y para lo cual se han hecho diversas propuestas de moldes que están fabricados en hierro con cavidades de acero cromado [MART72] e inclusive se tienen noticias de patentes que involucran cavidades de vidrio que permiten lograr productos de acabado especialmente terso.

Los moldes usados hoy son metálicos y articulados por lo general y permiten su apertura casi completa para facilitar la extracción del panel, además de que algunos diseños de moldes permiten producir diferentes productos cambiando los elementos de las cavidades [WEHIN80]. Los moldes están montados sobre un sistema de movimiento circular continuo lo que permite una alimentación constante de masa al sistema de moldeo.

- Secado de los paneles

Después del fraguado, los paneles son retirados de los moldes y depositados en carros que los conducen a un túnel de secado con temperatura constante de 54 °C y provistos con elementos que impiden la condensación de humedad dentro del túnel. Los paneles se mantienen en el túnel hasta que se obtiene una humedad, para entonces ser retirados y conducidos a un almacén.

3.3.1.1 Características generales de los paneles de yeso para tabiques

Aunque en la construcción se dispone una gran variedad de diseños y acabados de paneles, según la Norma correspondiente, éstos deberán tener forma de paralelepípedo y estar preparados con partes macho-hembra para favorecer su ensamblaje en el paramento. Los elementos podrán ser sólidos o con huecos en sus caras, siempre y cuando el área de los huecos no supere el 40% del área total del panel.

Los paneles de yeso o escayola en España son regulados con la Norma UNE 102 020 [1998] y cuyas disposiciones generales se resumen así:

a. Dimensiones

El espesor mínimo será de 50 mm y un máximo de 150 mm. La longitud del panel máxima del panel es de 1000 mm y su altura corresponderá a que la superficie del panel sea de al menos 0,20 m².

b. Densidad

Son tres los tipos de paneles según la densidad aparente que muestra el elemento seco:

- Baja densidad, entre 600 y 800 kg/m³
- Media densidad, entre 800 y 1.100 kg/m³
- Alta densidad, entre 1,100 y 1.500 kg/m³

También hay disponibles en el mercado paneles aligerados o de baja densidad

c. Resistencia mecánica

La norma no marca valores mínimos a cumplir sólo indica que la tolerancia máxima permitida podrá ser de un 10% con respecto a la media de los paneles ensayados.

d. Dureza superficial

La dureza se determina de los elementos constructivos en cuestión será al menos la siguiente:

- Paneles de baja densidad 40 unidades
- Paneles de media densidad 55 unidades
- Paneles de alta densidad 80 unidades

e. Resistencia al impacto

Los tabiques formados por paneles de yeso o escayola durante su instalación y uso pueden quedar expuestos a diversos eventos que lo pueden dañar. La Norma señala que la prueba de resistencia al impacto que debe de pasar un panel consiste en que la huella dejada por una bola de acero con una energía potencial de 245 J no será superior a 20 mm Ø.

3.3.2 PLACAS DE YESO O ESCAYOLA Y COMPLEMENTOS PARA TECHOS

Las placas para techos de yeso o escayola son elementos prefabricados destinados para la fabricación de techos suspendidos, esto es, para cielorrasos continuos o cielorrasos desmontables.

Los cielorrasos son elementos constructivos que buscan cumplir con las siguientes funciones dentro de los edificios:

- Cooperar a aislar térmicamente el espacio situado bajo el cielorraso
- Cooperar a mejorar el confort acústico del espacio situado bajo el cielorraso
- Cooperar al acondicionamiento fónico del espacio situado bajo el cielorraso

Otra función que cumplen los cielorrasos es el de proveer un espacio que puede alojar las instalaciones del edificio que por seguridad o apariencia se desean ocultar. A esta zona del elemento constructivo se le llama *plenum*.

3.3.2.1 Placas para techos continuos fabricadas con escayola

Las placas fabricadas con escayola para techos continuos son elementos prefabricados con maquinaria y procesos especiales que tienen formas ortogonales con superficies lisas o decoradas. Pueden estar preparadas con aditivos según las características del producto y usualmente contienen adiciones inorgánicas ligeras y fibras orgánicas o minerales.

La cantidad y tipos de aditivos empleados en la fabricación de las placas influye en las características mecánicas de las placas. Dependiendo de la fórmula empleada por el fabricante se aditiva con una cantidad de fibra de vidrio que va de 20 a 65 g y que equivale de un 0,15 % a un 0,5 % en peso del peso final del elemento endurecido y seco.

Las propiedades de las placas para techos continuos se regulan en la Norma UNE 102 024 [1983].

Las placas comunes son de dos tipos:

- Placa lisa o plancha lisa

Este elemento mantiene un espesor continuo en toda su estructura.

- Placa de contramolde

La placa de contramolde muestra un marco con un ancho y espesor continuo que rodea una superficie de menor espesor; generalmente los diseños más comunes cruzan a la superficie delgada con nervaduras que permiten aligerar el producto sin afectar sensiblemente a su estructura.

3.3.2.1.a Características de las placas de techos continuos

Las siguientes especificaciones para las placas y los ensayos correspondientes se refieren a las Normas UNE 102 011 [1986] y UNE 102 033 [2001]. De las cuales se señalan los puntos de mayor importancia para la investigación.

- a. Dimensiones

Las dimensiones se establecen de la siguiente manera y se admitirán otras dimensiones que cumplan las tolerancias marcadas por la misma Norma.

Tabla 3.5 Dimensiones preferentes para placas de techos continuos de escayola

Dimensiones Nominales	Dimensiones preferentes (mm)
Longitud	1.000 – 1.500
Anchura	600 – 1.000
Espesor	12, 15 y 20

- b. Contenido de humedad

La escayola es un regulador higrotérmico lo que coopera a mantener el equilibrio de humedad en el ambiente donde es colocado y esta misma propiedad la muestran las placas para techos continuos. El contenido medio en humedad de las placas será inferior a un 5% y en ningún caso los valores individuales reportados durante los ensayos pueden superar el 6%.

- c. Masa

La masa por unidad de superficie de cada placa no se desviará más de un 4% de la masa media. La masa de cada placa no superará los 16 kg/m².

- d. Comportamiento ante el fuego

Los productos que constituyen una placa, principalmente escayola y fibra de vidrio, por su naturaleza inorgánica son materiales no combustibles. La clasificación de las placas para techos continuos según la clasificación española son M0 (no combustibles) característica que los hace elementos constructivos ideales para aplicaciones donde hay posibilidades de incendio o en aquellos lugares señalados por otras Normas Tecnológicas de Construcción [NTE-RTC-1973].

3.3.2.2 Placas para techos desmontables fabricadas de Escayola

Las placas fabricadas para techos desmontables son elementos constructivos ortogonales prefabricados con base a una mezcla de agua y escayola con posibles adiciones de inorgánicas ligeras y de fibras minerales. Se producen con maquinaria y procesos especiales para ser después colocadas en seco sobre perfiles metálicos previamente instalados en obra. Las placas pueden ser lisa o decoradas y algunas muestran refuerzos en sus cantos para mejorar su manejo, también pueden fabricarse perforadas para mejorar sus propiedades acústicas, si este es el caso deberán ir protegidas en su dorso con una cubierta de fibra de vidrio o algún otro aislante de características similares.

3.3.2.2.a Características de las placas para techos desmontables

Las características de las placas para techos están regulados por la Norma UNE 102 021 [1983] y de la cual se anotan los puntos de interés.

a. Dimensiones

Las dimensiones señaladas en la Norma son las preferentes y se muestran a continuación en la tabla 3.6, sin embargo se aceptan otras dimensiones siempre que cumplan con las tolerancias exigidas para las dimensiones preferentes.

Tabla 3.6 Dimensiones preferentes y tolerancias por tipo de placas para techos desmontables

Tipo de placa	Dimensiones nominales preferentes por tipo de placa (mm)		
	A	B	C
Longitud	600 – 1.200 (+/- 1)	600 – 1.200 (+/- 1)	600 (+/- 0,5)
Altura	600 (+/- 1)	600 (+/- 1)	600 (+/- 0,5)
Espesor nominal	15 (+/- 1)	22 (+/- 1)	30 (+/- 0,5)
Espesor mínimo del canto	8	8	15

b. Contenido de humedad

El contenido medio en humedad de las placas será inferior a 5% y en ningún resultado individual superará el 6%.

c. Masa

La masa de cada placa no se desviará más de un 5% con respecto a la masa media.

3.3.2.3 Complementos para techos de yeso o escayola

En el mercado hay una gran diversidad de productos para el acabado o decoración de techos construidos con placas de escayola. Estos complementos también están fabricados en escayola. Entre los remates y complementos de uso general podemos mencionar molduras, cornisas, cortineros, escuadras, plafones y rosetas entre otros más.

3.3.3 PLACAS DE YESO LAMINADO

Las placas de yeso laminado son productos de gran importancia en la construcción por las múltiples aplicaciones en las que se les aprovecha. Las placas de yeso son elementos constructivos planos de uso superficial que tienen un espesor pequeño en comparación con el resto de sus dimensiones, que se fabrican con la aportación de materiales que cooperan con el yeso para mejorar y mantener sus propiedades.

3.3.3.1 Características de los materiales de placas de yeso laminado

Estos elementos constructivos se fabrican mediante un proceso altamente mecanizado de laminación continua que forma placas rectangulares con diferentes dimensiones. El proceso general de la fabricación de placas se describe más adelante.

Las placas se constituyen por un núcleo de hemidrato rehidratado reforzado por dos hojas de cartón resistente fuertemente unidas al yeso y que hacen las funciones de una armadura externa. El núcleo de yeso puede estar fabricado con diversos aditivos que le confieren propiedades que mejoran su comportamiento durante la producción o las cualidades del producto terminado como la resistencia mecánica, la resistencia al fuego o a la humedad entre otras. Los cartones generalmente están constituidos cada uno por diversas capas de celulosa y sus características pueden variar de acuerdo a la aplicación final de las placas [ASTI97].

Las características de las placas de yeso laminado en España se regulan a través de la Norma 102 023 [1998]; en ella se define a la placa con las letras PYL y se precisan las dimensiones, partes y las formas particulares que pueden tener las placas y de los cuales aquí se reseña los elementos más importantes.

3.3.3.1.a Núcleo de las placas de yeso

Para la fabricación del núcleo de las placas se usa una pasta de yeso de prefabricados con una mayor pureza y resistencia que los yesos de construcción [ARRED91]. La pasta está constituida fundamentalmente por sulfato cálcico semihidratado y anhidrita II, que durante su preparación es adicionada con diversos aditivos que facilitan el sistema de producción o para conseguir mejoras específicas para el producto. Los aditivos empleados entre otros pueden ser reguladores de fraguado, endurecedores, agentes depresores de absorción de agua, etc. Durante su producción, las placas pueden recibir agregados como fibras vegetales o minerales o aligerantes diversos y que describe con mayor detalle en el Anexo A 2.

3.3.3.1.b Envoltentes de cartón de placas de yeso

Los envoltentes de las placas son productos de fabricación especial para el proceso, donde el lienzo de cartón está formado a su vez de diversas capas de celulosa. El envoltente tiene las propiedades adecuadas tanto al proceso de fabricación como a las aplicaciones finales de la placa de yeso que se trate.

Las placas de yeso deben presentar envoltentes que por su cara visible permitan recibir acabados decorativos convencionales como pintura o papel. Por su cara no visible o dorso el envoltente de celulosa debe facilitar la instalación del producto en obra; generalmente ambos lados de la placa esta dotados con cartones de diferente color para su correcta instalación.

3.3.3.1.c Tipos de bordes de placas de yeso

Los bordes más largos de las placas pueden ser fabricados con distintos perfiles para favorecer aplicaciones específicas. Los bordes con sus variaciones pueden ser cuadrados, biselados o redondos y sus características se señalan en la norma UNE 120 023.

3.3.3.1.d Dimensiones de las placas

En el mercado internacional se encuentran varias medidas de las placas. En España las medidas estándar son:

- El ancho es de 1.200 mm, aunque se aceptan otros anchos como 600, 900 y 1.250 mm
- Las longitudes son entre 2.000 y 3.000 mm
- Los espesores aceptados son 6; 6,5; 9,5; 12,5; 15; 18; 19; 23 y 25 mm

3.3.3.2 Propiedades generales de las placas

Las características de las placas se indican en la Norma UNE 102 035 [2001]; aquí se describen las de interés para esta investigación:

3.3.3.2.a Resistencia mecánica a la flexión

La carga media mínima según espesor se indica en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Carga de rotura a la flexión mínima de placas de yeso laminado según la Norma UNE 102035

Espesor en mm	Carga de rotura, sentido longitudinal	Carga de rotura, sentido transversal
9,5	400	160
12,5	550	210
15	650	250
Otros espesores	43 x t	16,8 x t

3.3.3.2.b Resistencia al impacto

Dadas las aplicaciones de las placas de yeso laminado sus caras visibles quedan expuestas a recibir impactos por lo cual conocer su comportamiento a impactos resulta de interés. Según la Norma UNE 102 035, la cara de una placa sometida a un impacto de 2,5 J y según el método descrito en la misma Norma no presentará rotura, ni fisuras, ni huella de diámetro superior a 20 mm.

3.3.3.2.c Otras propiedades de las placas de yeso

Algunas características de las placas de yeso laminado de interés adicional para la investigación son las siguientes:

- Conductividad térmica: $(\lambda) = 0,18 \text{ W/mk}$
- Su clasificación por comportamiento al fuego es M1, no inflamable
- Peso: entre 800 y 1000 kg/m^3

3.3.3.3 Tipos de placas de yeso laminado más comunes en el mercado

Son varias los tipos de placas de yeso que se consiguen por medio de modificaciones que se practican durante su fabricación, aquí se señalan con una abreviatura a las más frecuentes [VILLA01]. Las marcas comerciales generalmente agregan esta abreviatura a su código de producto particular.

3.3.3.3.a Placa estándar STD

Es el producto básico para los sistemas que se fabrican en base a las placas de yeso laminado si no se requieren de características especiales. Sus aplicaciones comunes son de albañilería interior o de obra general.

3.3.3.3.b Placa F

La placa F es una placa estándar pero que al núcleo se le agregan componentes que mejoran la resistencia al fuego del producto. Los agregados generalmente son fibra de vidrio de 3 a 30 mm u otros similares, con una proporción en peso cercana a los 0,2% [KNAUF04]. Estas placas se aplican en construcciones donde es necesaria una especial protección al fuego como albañilería interior y techos suspendidos.

3.3.3.3.c Placa AD

Estas placas se instalan en zonas donde se esperan riesgos importantes de daño por impacto; para ello las placas AD se formulan con aditivos para lograr una mayor dureza superficial comparada con otros tipos de placas aunque eso significa una ganancia en peso del producto.

3.3.3.3.d Placa HR

Las placas de yeso HR se producen con un tratamiento hidrófugo en sus envolventes, por lo cual la absorción superficial de agua será menor de 160 g/m^2 y que le permite cumplir con lo exigido por la Norma UNE 102035. Este tipo de placa se usa en zonas donde la humedad puede dañar a la placa estándar (STD).

3.3.3.3.e Placa H

La placa de yeso H es un producto fabricado con un tratamiento de aditivo de aceite siliconado [PLADU05] tanto en sus envolventes como en núcleo de yeso, lo que le permite disminuir su absorción de agua por inmersión por debajo del 5% con relación al peso seco inicial de acuerdo a la Norma 102035. Este producto se aprovecha en edificaciones situadas en condiciones de humedad muy severas.

3.3.3.3.f Placa M0

Esta placa se usa en sistemas de protección al fuego de altas exigencias y cuando se requiere una reacción al fuego tipo M0 (incombustible) de los paramentos fabricados y que es diferente de la reacción del resto de las placas que se clasifican como M1 (no inflamables). En la placa se han sustituido sus cubiertas de cartón o papel por velos de fibra de vidrio y también al núcleo se le ha adicionado de fibra de vidrio.

3.3.3.4 Transformados con placas de yeso laminado

Los transformados son productos fabricados usando placas de yeso laminado de cualquier tipo y a las cuales se les ha agregado en su cara o en su dorso algún revestimiento con el fin de conseguir un elemento constructivo con características especiales y que no pueden ofrecer por sí mismas las placas de yeso.

En el mercados son muy numerosos los productos transformados de placa de yeso laminado, aquí solamente se les agrupa para su descripción a aquellos más comunes:

3.3.3.4.a Transformado de barrera de vapor (BV)

Sobre el dorso del transformado se aplica un laminado plástico, generalmente de PVC que funciona como barrera de vapor.

3.3.3.4.b Transformado para aislamiento térmico (XPE)

En este producto sobre el dorso de la placa de yeso laminado se ha adherido un panel de EPS de densidad muy baja (tipo III, 15 kg/m³) con el fin de mejorar sus cualidades de aislamiento térmico. El conjunto se instala usualmente en trasdosados de muros interiores.

3.3.3.4.c Transformado para aislamiento térmico (XPS)

Sobre el dorso de la placa se ha adosado un panel de PS fabricado por extrusión con densidad 30 kg/m³ y aditivado contra fuego, por lo que ofrece una reacción M1 (no inflamable). El transformado se instala en sistemas de aislamiento térmico y muros exteriores de trasdosados.

3.3.3.4.d Transformado con lana de roca (LR)

Al dorso de la placa de yeso se le adhiere un panel de lana de roca de 90 kg/m³ con diversos espesores que le permite funcionar al trasdosado como aislante térmico y acústico en trasdosados exigencias mayores.

3.3.3.4.e Transformados de lana de vidrio

Este producto tiene fines de aislamiento térmico y acústico de trasdosados. A la placa de yeso laminado se le adiciona en su dorso un panel de lana de vidrio con diferentes densidades y espesores.

3.3.3.4.f Transformados para techos y paramentos predecorados

Estos transformados se fabrican con placas de yeso a las cuales se les adhiere una lámina de PVC con decoración que se destinan a paramentos (PVP) y a techos (VTR) preparados con un acabado decorativo.

3.3.3.4.g Transformado de placa perforada

Estos transformados son placas de yeso laminado que se fabrican con perforaciones de diferentes formas (circulares, ranuradas, etc) de lado a lado sobre sus caras. Usualmente se instalan adicionadas de lana mineral en techos suspendidos y trasdosados en sistemas de aislamiento acústico.

3.3.3.4.h Transformado de protección (RX)

El transformado RX tiene usos especializados ya que su fin es proteger de radiaciones a los usuarios de equipos de radiología o de equipos con riesgos similares. Está fabricado con una placa de yeso laminado a la que se le ha adicionado con una chapa de plomo en su dorso, lo que permite presentar un elemento constructivo para seguridad pero también decorado.

3.3.3.4.i Transformado de Trillaje

Los trillajes se usan en tabiques, trasdosados y elementos de decoración. Estos transformados son un panel sándwich donde entre dos placas de yeso laminado se instala una estructura de cartón con forma de panal con un espesor de 30 mm.

3.3.3.5 Sistema de producción de la placa de yeso laminado

La fabricación de la placa de yeso laminado es un sistema continuo y automatizado donde la producción media de una empresa se estima alrededor de 90.000 m² al día, esto es entre 20 y 25 millones de m² al año [VILLA01]. Las fases generales de la producción son las siguientes [ASTI97] [GONZA04]:

- a. Después del proceso de molienda y calcinación simultánea de la piedra de aljez con una pureza media del 90%, se obtiene semihidrato cálcico ($\text{Ca SO}_4 \cdot 1/2 \text{ H}_2\text{O}$) y que puede mezclarse con anhidrita artificial para obtener un material en polvo.
- b. El semihidrato se mezcla con agua y diversos aditivos que adaptan los materiales a las exigencias de calidad del producto y a las características del proceso. Se obtiene una pasta fluida que a la salida de la mezcladora es depositada homogéneamente sobre un cartón alimentado ininterrumpidamente por una bobina y que es conducido por la banda móvil. Posteriormente se agrega el cartón superior, alimentado por otra bobina y se le da el espesor deseado al material de yeso a través de una niveladora.
- c. La placa de yeso en continuo es conducida por la banda transportadora hasta un punto donde ya ha fraguado el núcleo de yeso, es cortada a una longitud cercana a la que tendrá el producto terminado.
- d. Las placas individuales son conducidas en una banda transportadora y colocadas en un horno de secado que mantiene una temperatura cercana a los 100 °C durante 1 h y que permite extraer un 99% de la humedad de la placa.
- e. Las placas son retiradas del horno y conducidas para ser recortadas en sus extremos transversales a la medida exacta requerida para el producto terminado. Finalmente son precintadas y colocadas por lotes en un almacén.

El elemento constructivo que se denomina placa estándar comercial será el producto de referencia que sirve de testigo para todos los ensayos físicos y mecánicos descritos en el capítulo 6, apartado 6.2. A continuación se describen las características de las placas de yeso laminado comercial de distintos proveedores usadas en esta tesis:

Tabla 3.8 Características de las placas de yeso laminado estándar comercial

Descripción	Tipo	Dimensiones	Borde	Clasificación al fuego	Peso kg/m ²	Utilización
Placa de yeso comercial	Estándar (STD)	12,5 x 1200 x 2500 mm	Cuadrado	M-1 No inflamable	10	Local libre de humedades
Placa de yeso comercial	Estándar (N)	12,5 x 1200 x 2500 mm	Cuadrado BA	M-1 No inflamable	10	Local libre de humedades

Las placas de yeso laminado según sus fabricantes, tienen un núcleo de composición estándar recubierto en ambas caras y sus bordes longitudinales con celulosa multicapa. Se producen atendiendo la norma española UNE 102023:98. *Placas de yeso laminado. Condiciones generales y especificaciones*. Se identifican en sus bordes por una banderola de colores blanco y azul con la inscripción: *Standard*.

No se especifican las marcas de las placas de yeso laminado en ningún caso, debido a que estos elementos sólo sirven como materiales de comparación con los materiales propuestos en esta tesis y por lo tanto, no es la intención validar las cifras ofrecidas por los fabricantes ni contraponer los datos que resultaron de los ensayos realizados a las placas comerciales.

3.4 ESTADO DE LA TÉCNICA

En esta tesis se investiga sobre un material heterogéneo formado a su vez por los siguientes componentes básicos: los residuos de EPS y el yeso o la escayola conglomerados con agua, por lo cual la investigación acerca del estado de la técnica resulta muy amplia y por su volumen los grandes temas al respecto se han ubicado en los anexos A.1 (El poliestireno expandido) y A.2 (Perfil técnico del yeso) del documento.

En este apartado se busca describir algunos de las partes más representativas de los trabajos otros investigadores y que por su cercanía a las mezclas de esta investigación resultan de especial interés. Las razones para la presencia de estos trabajos pueden ser las siguientes:

- Manejan algunos de los componentes empleados en las mezclas de esta investigación
- Desarrollan materiales con objetivos similares aunque con componentes distintos
- Aplican poliestireno expandido virgen o procedente de residuos
- Aplican materiales aligerantes para mezclas con conglomerantes hidráulicos
- Buscan nuevos materiales aligerados con aplicaciones en la construcción
- Combinan algunos de estos elementos

Al termino de cada descripción se señalan las partes comunes y las diferencias que tienen los trabajos de estos autores con las placas y paneles de residuos de EPS conglomerados con yeso o escayola que se han desarrollado en esta tesis.

3.4.1 TRABAJOS DESARROLLADOS POR OTROS INVESTIGADORES

3.4.1.1 Fabricación de paneles con papel reciclado y partículas de madera de pino aglomeradas con yeso

En el trabajo desarrollado por Haselein et al [HASEL02] los paneles conglomeradas con yeso resultan de la adición de partículas de madera y papel reciclado en una matriz de yeso prensada.

Los paneles para la construcción de yeso reforzados con partículas de madera son fabricados desde hace veinte años en diversos países como Finlandia y a pesar de ser un elemento constructivo relativamente nuevo, es popular en Suiza y Alemania.

Los paneles en cuestión ofrecen ventajas sobre otros productos similares para la construcción ya que poseen resistencia mecánica, buena resistencia al fuego y son fácilmente maquinables con herramienta común. Sin embargo conocidas las propiedades del yeso en condiciones de construcción en exteriores (anexo A.2) el mejor desempeño de los paneles de yeso se da en el interior de los edificios.

Buscando evaluar posibles mejoras de las características de resistencia de los paneles de yeso Haselein desarrolló una investigación que llevó a ensayar diferentes tipos de paneles de yeso.

Los paneles fueron fabricados con varias proporciones de agua en la preparación del conglomerante de yeso (0,4 y 0,8 con relación al peso del yeso seco) y reforzados con partículas de madera de pino (con dimensiones nominales de 20 x 20 x 0,6 mm y siempre en proporción del 0,25 en relación al peso del yeso seco). Como fibras de refuerzo también se han

agregado a los paneles papeles reciclados y cortados de periódico y de imprenta (offset). De esta manera se obtuvieron tres tipos de muestras; las de yeso puro, las que contienen partículas de madera y las que contienen papel reciclado.

Las muestras fueron prensadas en frío en condiciones de laboratorio de una forma similar a las técnicas de producción de los elementos constructivos de yeso.

Los paneles obtenidos fueron acondicionados en cámaras climatizadas y después sometidos a los siguientes ensayos; flexión, dureza, capacidad para sujetar un tornillo ante un tirón e hinchamiento del panel por absorción de humedad.

En cuanto a los resultados de la prueba, los investigadores encontraron que en relaciones de agua menores al 0,6 en peso con respecto al yeso seco, resultan de difícil trabajabilidad dada la alta viscosidad de la masa que resulta y su rápido fraguado. Sin embargo reportan haber logrado muestras conteniendo una relación de agua del 0,4 en peso adicionadas con papel reciclado y partículas de madera de pino.

Tabla 3.9 Reporte de resultados de los materiales elaborados por Haselein

Compuesto	Relación yeso - agua	Densidad (kg/m ³)	Módulo de ruptura a la flexión (MPa)
Yeso puro	0,8	1100	2,14
Yeso – papel periódico	0,4	1180	8,35
Yeso – papel imprenta	0,4	1180	2,88
Yeso-partículas de madera	0,4	1080	4,13
Yeso – papel periódico	0,8	1130	6,06
Yeso – papel imprenta	0,8	1160	0,70

En la tabla 3.9 se resumen algunos datos de interés para esta tesis. La prueba de flexión resultó con los mejores resultados (8,35 MPa) en probetas que contienen fibras procedentes de papel periódico y con una relación de agua del (0,4), comparados con las muestras de yeso puro (2,14 MPa). Las densidades más bajas (1080 kg/m³) se consiguieron con la mezcla de yeso con partículas de madera de pino y una baja participación de agua (0,4).

No se detallan aquí los resultados de la prueba de capacidad para sujetar un tornillo ante un tirón pero se puede señalar que todos los resultados mejoraron al obtenido por la muestra de yeso puro.

Los investigadores concluyen que la inclusión de fibras produce un mejoramiento en las propiedades de las placas de yeso en comparación con placas fabricadas con yeso puro. También apuntan que el hinchamiento de las placas que contienen papel siempre fue menor al 1% después de inmersión de 24 hrs. En general los mejores resultados se dieron en placas con relación de agua 0,4 comparadas con las placas con relación de agua 0,8.

Las relaciones que guarda la investigación que se ha mostrado con esta tesis son las siguientes:

- Uso de yeso como conglomerante de residuos en la fabricación de placas para la construcción.
- Experimentación con proporciones de agua no convencionales en la preparación del yeso.
- Uso de fibras procedentes de residuos municipales para el refuerzo de placas de yeso.

3.4.1.2 Desarrollo de materiales compuestos yeso-corcho para aplicaciones en la construcción.

El trabajo muestra los resultados del trabajo experimental acerca de un material compuesto corcho – yeso. Hernández Olivares F. et al [HERNAN99] parten de establecer que la compatibilidad entre el yeso y el corcho y su mezcla en diferentes fracciones, hace posible desarrollar nuevos materiales de construcción.

La investigación plantea el uso de trozos que resultan de la poda de varios tipos de árboles españoles productores de corcho. Esos trozos se mezclan con una pasta de yeso que se prepara en dos series de muestras; una de 60% y otra serie de 80% de agua con relación al peso seco del yeso.

La cantidad de corcho molido empleado en la preparación de las muestras ensayadas es 20% en peso del yeso seco.

Para analizar una posible mejora a la flexión de los materiales ensayados, algunas de las mezclas se han preparado con una pasta que contiene yeso en una relación del 80% de agua, 20% de corcho en masa del y además con el equivalente al 2% fibra de vidrio de la masa seca de yeso.

También dentro del mismo trabajo experimental se han fabricado otras probetas heterogéneas formadas por varias capas (que el autor denomina *sándwich*); una capa gruesa de compuesto al 80% de agua y corcho al 20% con relación al peso seco. La muestra además cuenta como refuerzo con otra capa delgada de unos 5 mm de espesor de yeso con una fracción de fibra de vidrio de 2,5 cm de largo y en una proporción de 2% en masa seca del yeso.

Una vez obtenidas las muestras se ha una medición para determinar su densidad aparente y se han aplicado ensayos de flexión y compresión a las probetas.

La medición de la densidad aparente de las muestras ensayadas en el experimento indican que se ubica entre 800 kg/m^3 ($0,8 \text{ g/m}^3$) y 1000 kg/m^3 ($1,0 \text{ g/m}^3$) lo cual representa una densidad competitiva con otros productos de yeso y que el autor fija en más de 1200 kg/m^3 ($1,2 \text{ g/cm}^3$).

Por lo que respecta al comportamiento a la flexión, Hernández-Olivares, et al. señalan que los promedios de los resultados por muestras ensayadas se ubican en un mínimo de 1,94 MPa y 3,52 Mpa. El primer dato se produce entre las muestras con una relación de agua de 80% y el segundo entre las muestras preparadas con 60% de agua con relación a la masa del yeso.

El grupo de investigadores fabricó también muestras con diferentes cantidades de corcho para así establecer una comparación de comportamientos. Se produjo una serie con 10% corcho en masa contra el yeso y otra serie con 20%; los dos grupos se formularon con la misma cantidad de agua del 60% con relación al peso seco del yeso. Los resultados fueron mejores para la serie de muestras con mayor cantidad de corcho donde la relación entre promedios logrados para cada serie fue de 2,15 MPa y de 3,40 MPa respectivamente para el ensayo de flexión en

tres puntos. Para la compresión los datos fueron 4,88 MPa y 8,17 MPa para las series con 10% y para la serie con 20% de corcho respectivamente.

La serie de muestras con adición de trozos de fibra de vidrio (2%) reportan que hay un significativo aumento en la resistencia mecánica de estas muestras a la flexión con un promedio de 7,19 MPa y a la compresión con un promedio de 7,94 MPa.

La investigación también marcó los valores de conductividad térmica de algunos de los materiales ensayados y que sitúa a sus coeficientes (λ) promedio entre 0,125 y 0,199 W/mK. Estos datos y su baja densidad aparente sugieren que los materiales de yeso-corcho pueden ser aplicados en la construcción como aislantes térmicos.

Como conclusión se tiene que las propiedades mecánicas de los materiales yeso – corcho son pobres comparadas contra las de los yesos sin agregados (Anexo A.2) por lo cual se hace deseable la incorporación de refuerzos para mejorar la resistencia de estos compuestos.

Otra conclusión habla de que dada la baja densidad y aceptable coeficiente de conductividad térmica de los materiales de yeso-corcho estos compuestos son susceptibles para ser usados como particiones en el interior de las edificaciones.

Las relaciones que guarda la investigación sobre los compuestos yeso-corcho con esta tesis son las siguientes:

- Uso de yeso o escayola como conglomerante de residuos como material para la construcción
- Uso de materiales porosos en materiales compuestos con yeso o escayola
- Uso de refuerzos para materiales compuestos de yeso o escayola

3.4.1.3 Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para construcción

El material expuesto en la patente ES 2 170 612 A1 [RIOMER02] está compuesto principalmente por yeso y desechos granulados de corcho en las siguientes proporciones (todas en relación a la masa del yeso seco):

- Yeso o escayola para prefabricados E-30 o E-35 (ver anexo A.2)
- Entre 20 % y 25 % de desechos de corcho granulados. El autor indica que esta proporción se puede sustituir por 3% de perlas de poliestireno expandido de diámetros entre 3 – 5 mm y a la que le llama también *corcho artificial*.

El material de yeso-corcho también está adicionado de fibra de vidrio E al 2%, y un fluidificante de la pasta entre el 0,5 y el 1% que permite trabajar al yeso o escayola en proporciones de 60% de agua, lo que mejora las propiedades mecánicas del material fraguado.

Se indica en la patente que el material obtenido es un material sólido y estable donde una de sus principales características es su baja densidad entre 55 kg/m³ y 60 kg/m³ por lo que su aplicación más inmediata es en la sustitución de prefabricados para particiones interiores y trasdosados que ya existen en el mercado pero con un peso mayor. La misma patente propone los diseños de esos prefabricados:

Para las particiones interiores, el primer diseño son dos placas de yeso aligeradas (de 3,5 cm y 2 cm de espesor) separadas por costillas del mismo material lo que produce un hueco entre las placas que puede alojar diversas instalaciones. Se indica otro diseño similar pero este formado por dos placas iguales de (2 cm de espesor cada una).

Para los trasdosados se dan dos diseños; uno formado por una placa de yeso aligerada con corcho separada por costillas del mismo material unidos a un panel de EPS virgen (3 cm). El conjunto tiene un hueco para instalaciones y se adhiere al muro por cubrir. El segundo diseño es el de una placa de yeso aligerada (2 cm) adherida a un panel de EPS sin cámara intermedia.

Las relaciones que guarda la investigación sobre los compuestos yeso-corcho con esta tesis son las siguientes:

- Uso de yeso o escayola como conglomerante de residuos como material para la construcción
- Diseño de elementos constructivos usando materiales compuestos de yeso o escayola aligerados con corcho
- Procesos de fabricación de paneles de yeso por moldeo
- Uso de perlas de EPS en materiales compuestos con yeso o escayola
- Prefabricados de yeso o escayola aligerados
- Uso de refuerzos para materiales compuestos de yeso o escayola

3.4.1.4 Gránulos de poliestireno en materiales compuestos de cemento

Laukaitis et al [LAUKAIT05] del Instituto de Aislamiento de Vilnius Lithuania (Thermal Insulation Institute) analizan el uso de residuos de EPS triturados, para ser usados como agregados de compuestos de cementos espumados para aplicaciones de aislamiento térmico.

Esta investigación ofrece información de la interacción de 3 diferentes residuos de espuma de poliestireno con la matriz del material composite (el autor no usa el término EPS u otro similar sin embargo por sus descripciones observamos que habla de cuerpos redondos que corresponden a las perlas de EPS lo que permite pensar que se trata de poliestireno expandido).

Los materiales usados para la fabricación de muestras para la experimentación fueron cemento portland, un aditivo de espumado y un estabilizador para el cemento.

De residuos de espuma usados no se especifica su origen aunque se indica que proviene de residuos de espuma y de sobrantes de producción.

Los plásticos de EPS experimentados fueron de tres tipos que se agrupan en *gránulos gruesos*, *gránulos finos* y *gránulos molidos* (el autor no lo especifica pero por su descripción se puede deducir que en los casos de los dos primeros se trata de perlas vírgenes pre-expandidas de EPS).

Para la preparación de las mezclas experimentales variaron en proporciones que se manejaron en relaciones de volumen entre el cemento espumado y los gránulos de poliestireno. Las relaciones que se manejaron fueron 1:1, 1:2, 1:3.

Los elementos de los compuestos se prepararon y se moldearon en dos tipos: muestras con forma de cubos de 100 mm por lado y cubos de 400 mm por lado, para dejarse endurecer durante 28 días previos a su ensayo.

Resultados del experimento de Laukaitis:

Uno de los objetivos de esta investigación es el de observar las interacciones que se dan en la zona de contacto entre el plástico y el cemento. Así, muestras de los tres tipos se observaron en microscopio con los siguientes resultados:

Los *gránulos gruesos* tienen una forma esférica regular con una superficie también regular formada por un panal de cavidades separadas entre sí por delicadas películas de mismo plástico.

De la observación de los *gránulos finos* se indica que su morfología es diferente a la de los gránulos gruesos ya que si bien es también esférica, a diferencia de los gránulos gruesos la superficie de gránulos finos está formado por una agrupación de pequeñísimas burbujas mientras que en los gruesos la superficie es una sucesión de cavidades.

El último tipo de residuos de EPS los *gránulos molidos*, son partículas irregulares que se obtienen de la separación de gránulos de diámetro pequeño (cerca de 2 mm) interconectados, que resultan en morfologías intrincadas por la manera como fueron separados. Las superficies de los gránulos molidos es como en el caso de los gránulos gruesos, una especie de panal, pero en los gránulos de molido la superficie se muestra generalmente muy dañada.

Los investigadores señalan que las diferencias entre los materiales que se han descrito antes determinan su desempeño en el material compuesto.

También se ofrece una descripción de la distribución por tamaños de los grupos de materiales que se reproduce en la tabla:

Tabla 3.10 Composición por tamaños de los gránulos de EPS experimentados

Tamaño del tamiz (mm)	Gránulos gruesos %	Gránulos finos %	Gránulos molidos %
10,2	43,9	1,45	1,02
5	55,9	60,89	28,27
2,5	0,05	37,62	63,85
Menor a 2,5	0,10	0.03	6,86

De la observación en microscopio se tiene que los gránulos de poliestireno no mostraron una buena unión con el cemento que se atribuye a la naturaleza hidrofóbica del plástico y a que su superficie está cargada estáticamente. Esto provoca que el compuesto obtenido sea menos homogéneo y más frágil.

Densidades obtenidas

La experimentación reportó que el mayor descenso en la densidad aparente en los compuestos se da con el uso de gránulos gruesos. Donde las menores densidad se obtuvo en la relación de 1:3 (volúmenes de cemento espumado y gránulos de poliestireno respectivamente) con gránulos gruesos con 149 kg/m³ y con gránulos finos la misma relación resultó en una densidad de 167,8 kg/m³. La relación 1:3 no pudo llevar a cabo usando gránulos molidos debido a la extrema fragilidad de las mezclas.

Resistencia a la compresión

Debido a la presencia de gránulos de poliestireno en los compuestos, los ensayos se adaptaron a procedimientos similares a aquellos usados para los materiales ligeros de aislamiento.

Los investigadores señalan que las resistencias a la compresión de los compuestos experimentados están en relación a la densidades obtenidas y a los tipos de gránulos usados en el compuesto. Los gránulos finos permitieron las mayores resistencias a la compresión hasta en 40% más en promedio que los reportados para gránulos gruesos y hasta en 68% más comparados con los gránulos molidos. Donde para la densidad más baja obtenida (150 kg/m^3 con una relación 1:3) tuvo un resistencia a la compresión de $0,25 \text{ N/mm}^2$.

Conductividad térmica

El coeficiente de conductividad térmica de los compuestos ensayados depende del tipo de gránulos usados y de la densidad aparente del material. Los coeficientes obtenidos para las densidades más bajas o sea entre $150 - 170 \text{ kg/m}^3$ fueron de $0,060 - 0,064 \text{ W/mK}$ respectivamente.

Las relaciones que guarda esta tesis la investigación sobre las propiedades de los compuestos de gránulos de poliestireno con cemento espumado son las siguientes:

- Uso de perlas de EPS en materiales compuestos con conglomerantes hidráulicos de baja densidad.
- Ensayo y caracterización de compuestos para usos en la construcción que contienen perlas de EPS o residuos molidos de EPS.
- Caracterización de partículas de EPS procedentes de residuos

3.4.1.5 Nuevos materiales compuestos ligeros de baja conductividad térmica para la construcción

Esta investigación trata acerca de la aplicación de residuos agrícolas de coco y palma como una alternativa en materiales compuestos para la construcción en Tailandia [KHEDAR01]. Los residuos de fibras de coco y de palma se integran en mezclas de cemento y arena en diversas proporciones que después se sometieron a una serie de mediciones y ensayos de resistencia mecánica.

La investigación llevada a cabo por Khedari (et al) comenzó con la preparación de las muestras con formas de cubo de 50 mm por lado. Las proporciones empleadas para la fabricación fueron 40 combinaciones de cemento, 2 tipos de arena y residuos de coco o palma con 3 largos distintos.

Todas las muestras se prepararon teniendo como base la masa que forman el cemento con agua en una proporción fija de 1,5:1 (1,5 porción de agua y 1 de cemento).

Densidad aparente

Se han logrado densidades tan bajas como 770 kg/m^3 para un combinación de 1 parte de cemento, 1 parte de arena gruesa y 30 partes de fibra de coco corta (menor de 2 mm).

La más alta densidad de las muestras con residuos de palma fue de 1832 kg/m^3 con una combinación de 1 parte de cemento, 1 parte de arena media y 10 partes de residuos de palma largos (7,38 mm o más).

El trabajo experimental muestra que el uso de estos materiales es una propuesta prometedora como material para disminuir la conductividad térmica de materiales y para la fabricación de otros elementos constructivos.

3.4.1.6 Composiciones de yeso de bajo peso

La patente ES 2 178 407 T3 presentada por Jobbins [JOBBIN02] señala que el panel de yeso es un material de construcción relativamente denso. La disminución en su peso coopera a facilitar que su transporte, maquinado e instalación sean más fáciles. Sin embargo la disminución en la masa de la placa debe de hacerse afectando lo menos posible las propiedades mecánicas del panel.

El panel de yeso comercial contiene aproximadamente 70% de su volumen en aire y aproximadamente 30% del volumen se debe a la incorporación de burbujas de aire. Al aumentar las burbujas de aire la resistencia del panel decrece por lo cual la incorporación de burbujas al panel únicamente no parece ser una solución para disminuir el peso de los paneles de yeso para la construcción.

Jobbins señala que la incorporación de partículas aligerantes ha sido una de las tecnologías para disminuir el peso de los paneles de yeso donde se han usado vermiculita expandida y perlita. En épocas más recientes también se ha ensayado con partículas termoplásticas expansibles, que resultan con mejores resultados que la vermiculita expandida y la perlita, debido a que ofrecen células cerrada llenas de aire y densidades de $8 - 9,6 \text{ kg/m}^3$.

Sin embargo a las mejoras asociadas a la integración de aligerantes como los mencionados puede producirse fragilidad en el yeso, ya que el volumen ocupado por el material aligerante reduce la cantidad de matriz de yeso presente y disminuye su resistencia especialmente a esfuerzos de flexión.

Se propone un material que no necesita de partículas añadidas a la masa yeso-agua y que disminuye al mismo tiempo la densidad aparente del cuerpo fraguado que puede llegar hasta 640 kg/m^3 ($0,64 \text{ g/cm}^3$) sin disminuir su resistencia, por lo cual satisface las Normas C-36 y C-473 de la ASTM. La mejora se debe a la incorporación de un látex natural o sintético a la masa de yeso en combinación de un tensioactivo no iónico.

Las relaciones que tiene con esta tesis el trabajo mostrado son las siguientes:

- Manejo de paneles de yeso
- Aplicación de aligerantes en partículas para yesos

4

TRABAJOS PREVIOS A LA EXPERIMENTACIÓN



Trabajos previos a la experimentación

4

4 TRABAJOS PREVIOS A LA EXPERIMENTACIÓN

4.1 DETERMINACIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS DE ESPUMA DE EPS A USARSE EN LA EXPERIMENTACIÓN

4.1.1 INTRODUCCIÓN

De entre los materiales que participan en este trabajo de investigación, la información sobre las características de los residuos de espuma de EPS es la que resultó más escasa, tal vez debido a la novedad del tema y a que se asume que los datos que se ofrecen los fabricantes del material virgen son suficientes.

Las espumas de EPS, al momento de ser depositados en los contenedores de residuos, muestran tamaños y formas que por su heterogeneidad dificultan su integración en elementos constructivos con formas laminares como son las placas o los paneles; esto significa que tienen que ser modificados para su aprovechamiento de las maneras que busca esta investigación.

Aquí se exploran dos alternativas de transformación de los residuos:

- a. Seccionar residuos de espuma de EPS hasta obtener un tamaño conveniente para sus funciones y para su proceso de producción.
- b. Utilizar residuos de espuma de EPS molidos.

Durante los trabajos preparatorios hacia la experimentación se plantearon dudas acerca de la viabilidad de esas alternativas, de entre ellas dos sobresalieron por su importancia:

- Una vez colectados los residuos de espuma ¿como se convertirían esos materiales en cuerpos aprovechables dadas las aplicaciones del proyecto?
- Si se usan residuos molidos ¿qué características tienen esos materiales?

Se considera que dada la escasa información disponible, la mejor manera de responder a esas preguntas sería a través del trabajo directo sobre los residuos por lo cual se decidió practicar dos experimentos, mismos que se describen a continuación.

4.1.2 CORTE DE LOS RESIDUOS DE ESPUMA DE EPS

4.1.2.1 Descripción

Esta alternativa consiste en el corte de los residuos de espuma de EPS hasta reducirlos a pequeños cuerpos, que serán integrados a las mezclas que formarán los elementos constructivos. El corte se puede hacer por medio de un serrucho, una cuchilla o bien de una cortadora de alambre caliente especial para espumas de poliestireno.

4.1.2.2 Objetivos

- Evaluar diferentes procedimientos de corte susceptibles de ser usados para el corte de residuos de espuma de EPS.
- Evaluar el uso de pequeños cuerpos de espuma de EPS para su aprovechamiento en la fabricación de placas y paneles constructivos conglomerados con yeso o escayola.

4.1.2.3 Materiales y procedimiento

4.1.2.3.a Materiales

Las espumas usadas en la experimentación de corte de residuos de EPS proceden de dos orígenes, la primero, del contenedor cercano una escuela universitaria en Barcelona. Se reconoció uso original de las espumas recuperadas como un embalaje de impresoras de inyección de tinta. Estos residuos se encontraron limpios y en todos aparece el logotipo de marca de procedencia correspondiente y que fueron fabricados con al menos una parte del plástico reciclado. Otro grupo de residuos de EPS se obtuvieron en un contenedor de residuos de una población cercana a Barcelona (Mollet del Vallès); se encontraron con polvo y rastros de otras sustancias no identificadas del mismo contenedor; esta espuma se lavó con agua corriente únicamente y se secó a temperatura ambiente. Su uso original no se determinó con certeza, pero por sus formas y medidas se cree que su uso fue como embalaje de una nevera o aparato doméstico con dimensiones parecidas. Todos los residuos anteriores y que se han usado en la experimentación parece que han sido fabricados con espuma de EPS tipo III (densidad 15 kg/cm³).

De un contenedor de escombros de construcción se obtuvieron residuos de EPS de los cuales no se puede determinar su uso original y no portaba ninguna señal que indicara si en su fabricación se habían usados material reciclado. Estos residuos con forma de placa gruesa, tenían una apariencia más rugosa que aquellos que se describen en el párrafo de arriba y mostraban menor densidad (al parecer tipo I o II, de 10 o 12 kg/m³) además de rastros de polvo y cemento. Las espumas se limpiaron y lavaron con agua corriente para después secarse a temperatura ambiente. En estos residuos se apreciaron deformaciones notables en algunas de sus partes, como resultado de esfuerzos de compresión altos y sostenidos en sus aplicaciones originales.

El corte de los residuos se inició aplicando la navaja de taller, posteriormente se utilizó el serrucho y por último la cortadora de alambre. Al final, demostrados sus mejores resultados, el corte se hizo casi totalmente con la máquina de alambre caliente, aunque en ocasiones y por las grandes dimensiones del residuo hubo que reducirlo previamente con serrucho o con navaja.

4.1.2.3.b Equipo

Las características del equipo son:

Navaja de taller y regla metálica

Serrucho para madera de 35 cm

Cortadora de alambre caliente marca EMCO® modelo: Styro-Cut 3D

Flexómetro con lectura máxima de 2 m y graduación mínima de 1 mm

La cortadora EMCO® es de uso común para trabajos de maquetas arquitectónicas y de escenografía comercial. Su capacidad máxima de corte es de 250 mm de altura y el alambre caliente tiene una sección de 0,5 mm de diámetro.

4.1.2.3.c Procedimiento

1. Inspeccionar el residuo para buscar determinar su uso original, dimensiones, densidad aparente y posibles restos de sustancias extrañas. Anotar esas características.
2. Limpiar la espuma; si es necesario, lavarla con agua corriente y secarla a temperatura ambiente.
3. Determinar la estrategia y la herramienta adecuada para el corte de acuerdo a las características del residuo, de la forma y tamaño del cuerpo a obtener.
4. Preparar el equipo.
5. Cortar y separar por tipos los cuerpos seccionados.

4.1.2.4 Resultados del experimento de corte de residuos de EPS

Se realizaron cinco tipos de cortes (cuyas dimensiones máximas se señalan en la tabla 4.1) buscando lograr las formas más cercanas a un cubo o a un paralelepípedo con esas dimensiones por lado.

Estas figuras no siempre se lograron debido a las formas originales del residuo. Foto 4.1 y 4.2.

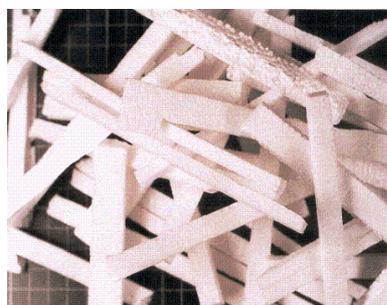


Foto 4.1 Residuos cortados en tiras Corte 4 (C4)



Foto 4.2 Residuos cortados en cubo C1

Tabla 4.1 Características de los residuos de EPS cortados manualmente

Nombre	Clave	Forma aproximada y dimensiones máximas
Corte 1	C1	Cubo de 1 cm
Corte 2	C2	Cubo de 0,7 cm
Corte 3	C3	Tira 1 x 1x 10 cm.
Corte 4	C4	Tira 0,7 x 0,7 x 12 cm
Corte 5	C5	Cubo de 1,5 cm

4.1.3 PERFIL DE LOS RESIDUOS MOLIDOS DE ESPUMA DE EPS

4.1.3.1 Descripción

Usar residuos molidos permite aprovechar el programa de recuperación de residuos de espuma que realiza la ANAPE a través de algunos de sus afiliados, quienes se han dado a la tarea de coleccionar los residuos donde se generan y reducirlos a través de molinos para después darles otras aplicaciones.

Debido a que las características del residuo molido de espuma de EPS que se usa en el experimento y que pueden afectar las aplicaciones que se buscan en este proyecto, resulta importante determinar algunas de sus particularidades como:

- Su limpieza
- Tamaño de las perlas completas
- Las cantidades de otros cuerpos de estireno presentes
- Proporciones de esta mezcla

El proveedor de los residuos señala que la única información con la que cuentan es que los residuos tienen dos procedencias, de embalajes de electrodomésticos y de obras de construcción.

Los residuos se venden en dos tipos, molido fino que contiene cuerpos de espuma en teoría no mayores de 0,4 cm de diámetro y molidos gruesos que contiene cuerpos de hasta 0,6 cm de diámetro.

Actualmente los mercados usuales para estos materiales son empresas cementeras y fabricantes de cerámica; estos últimos para la fabricación de termoarcillas [FIEST03].

4.1.3.2 Objetivos

- Desarrollar un perfil de los tamaños de las perlas que componen los residuos molidos con los que se trabaja.
- Desarrollar una composición porcentual aproximada de los diversos tamaños de perla en los residuos.
- Revisar la participación de otros cuerpos de estireno expandido como conjuntos de perlas no separados durante el molido, trozos de perlas y partículas del mismo material o de otros elementos que no sean de este plástico.

4.1.3.3 Materiales y procedimiento

4.1.3.3.a Materiales

En este apartado se caracterizan los dos tipos de residuos molidos de EPS, que se mencionan arriba. Ambos residuos se manejan en bolsas de polietileno y se conservan protegidos del sol y la humedad.

Para efectos de este estudio los residuos se han clasificado con una abreviatura (M) atendiendo las medidas señaladas por el reciclador, que son:

- Molido grueso de residuos de EPS (**MG**)
Cuerpos hasta 6 mm de diámetro (foto 4.3)
- Molido fino de residuos de EPS (**MF**)
Cuerpos hasta 4 mm de diámetro (foto 4.4)



Foto 4.3 Residuos molidos (MG), retícula de 1cm



Foto 4.4 Residuo fino (MF), retícula de 1 cm

4.1.3.3.b Equipo

Para la realización de este experimento se usó el siguiente equipo:

Lupa de 80 mm. de diámetro

Vasos de vidrio de 0,250 ml sin graduación

Vaso de precipitado graduado con capacidad de 100 ml

Calibrador con apertura de 200 mm y graduación máxima de 0,1 mm

Regla de madera de 30 cm de largo y graduación mínima de 1 mm

Regla de metal sin graduación

Vidrio de reloj

Pinza metálica

4.1.3.3.c Procedimiento

La medición e identificación de residuos se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. En un vaso de precipitado graduado tomar doce muestras de 250 ml c/u de los contenedores de los residuos molidos de la siguiente manera: dos muestras de la zona superior, dos de la central y dos de la inferior de cada contenedor de residuos.
2. Etiquetar cada muestra.

3. De cada muestra medir y separar los cuerpos de espuma por grupos, según la clasificación descrita en la tabla 4.2.
4. Depositar en un vaso de precipitado graduado cada grupo ya clasificado.
5. Medir y anotar el volumen que forma el grupo de los cuerpos de espuma.
6. Establecer su porcentaje de participación en el total de su muestra de origen.
7. Calcular la media aritmética de participación por cada grupo.

Tabla 4.2 Número y características de cada grupo de residuos molidos

Grupo	Características
1	Perlas entre 0 y 3 mm Ø
2	Perlas entre 3 y 5 mm Ø
3	Perlas mayores a 5 mm Ø
4	Trozos *
5	Conjuntos **

* Se consideraron *trozos* a aquellas partículas que a simple vista no fuesen estructuras cerradas o que mostrasen mutilaciones o daños en su forma y que pudiesen ser encerrados en una esfera imaginaria de 3 mm de diámetro como máximo.

** Se consideraron *conjuntos* a aquellos grupos de partículas que de forma evidente son trozos de perlas de EPS soldados entre sí y que pudiesen ser encerrados en una esfera imaginaria de 6 mm como máximo.

4.1.3.4 Resultados del experimento del perfil de residuos molidos de EPS

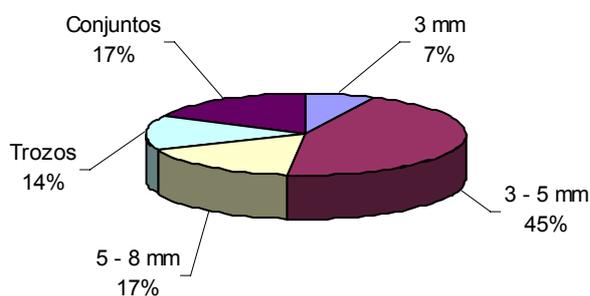
Para conocer algunas de las características del residuos molidos de espuma de EPS se ha realizado una medición sobre las muestras de los esos materiales disponibles para la investigación.

Los resultados se muestran a continuación en tablas que se ocupan de los residuos señalados por el proveedor como grueso (MG), fino (MF) y finalmente el cuadro completo de toda la medición (tablas 4.3, 4.4 y 4.5 respectivamente). Todos estos porcentajes son en volumen.

Tabla 4.3 Características y zona de procedencia de los residuos, molido grueso (MG)

Grupo	MG Superior Cantidad (%)	MG Centro Cantidad (%)	MG Inferior Cantidad (%)	Promedio (%)
1	5	6	10	7,00
2	45	46	44	45,00
3	16	15	20	17,00
4	15	18	8	13,67
5	19	15	18	17,33

Composición del Molido Grueso (MG)

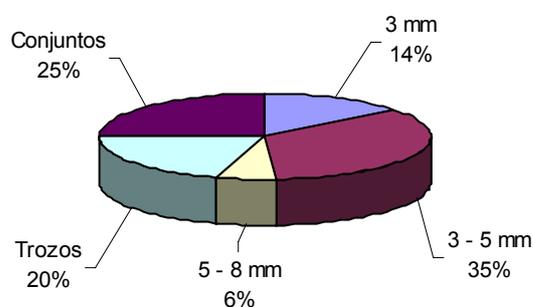


Gráfica 4.1 Composición por tamaños de residuos de EPS, molido grueso (MG)

Tabla 4.4 Características y zona de procedencia de los residuos, molido fino (MF)

Grupo	MF Superior Cantidad (%)	MF Centro Cantidad (%)	MF Inferior Cantidad (%)	Promedio (%)
1	15	10	18	14,33
2	35	36	33	34,67
3	5	6	6	5,67
4	20	20	21	20,33
5	25	28	22	25,00

Composición del Molido Fino (MF)



Gráfica 4.2 Composición por tamaños de residuos de EPS, molido fino (MF)

Tabla 4.5 Residuos molidos composición total de la muestra (MG y MF) por tamaños o características y zona de procedencia

Tamaño	MG Superior Cantidad (%)	MG Centro Cantidad (%)	MG Inferior Cantidad (%)	MF Superior Cantidad (%)	MF Centro Cantidad (%)	MF Inferior Cantidad (%)	Promedio general (%)
0 - 3 mm ø	5	6	10	15	10	18	10,67
3 - 5 mm ø	45	46	44	35	36	33	39,83
5 - 8 mm ø	16	15	20	5	6	6	11,33
Trozos	15	18	8	20	20	21	17,00
Conjuntos	19	15	18	25	28	22	21,17

4.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE EPS

Residuos cortados

El corte manual resultó una labor lenta y poco precisa lo que se puede explicar por la poca capacidad de la máquina disponible para el experimento, sin embargo existen en el mercado otras máquinas con mucha más capacidad que pueden hacer la misma función de corte de una manera más rápida.

La obtención de piezas y geometrías regulares resulta siempre difícil ya que esto depende en buena medida de las formas como se presenta el residuo.

Residuos molidos

Los residuos molidos se encuentran limpios o la presencia de otros materiales es prácticamente inexistente.

En el residuo grueso (MG) podemos observar que hay un promedio de 69% de perlas completas y 31% afectadas de alguna manera. Por otro lado en el material que proviene del molido fino (MF) la relación de cuerpos completos es de casi 55% y de 45% de cuerpos afectados por la molienda. Esto nos indica que el molido grueso muestra un mayor predominio de perlas completas que el molido fino.

En ambos tipos de molidos predomina la presencia de las perlas con dimensiones entre 3 y 5 mm de diámetro. En el MG esta situación se muestra más claramente con un 45% de promedio contra los otros tamaños, para el MF este tamaño de perlas disminuye casi al 35%. El promedio general de la muestra es de casi 40%.

En el molido grueso (MG) la presencia de las perlas de mayor diámetro (5–8 mm Ø) es notable con un 17%. Este grupo disminuye sensiblemente en el molido fino (MF) con un promedio de cerca del 6%.

En el MF resulta lógico que la presencia de perlas de mayor tamaño disminuya con relación a el MG. Sumados los porcentajes de los grupos 1,2 y 3 (3–8 mm Ø) en MF dan un 40% contra un 62% en el MG, mientras que los trozos y conjuntos en MF son un 45% contra 31% en MG en promedios correspondientes al total de la medición, lo que parece indicar que la espuma de donde se origina el residuo MF es de mayor densidad que aquel usado para la obtención del MG.

4.1.5 CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE EPS

Parece conveniente reconsiderar para el experimento el uso de los residuos cortados debido a las siguientes razones:

- El proceso de corte manual como se realizó a los residuos en trozo para este ensayo resulta lento y las piezas obtenidas son poco homogéneas en dimensiones y geometría. El uso de una máquina de mayor capacidad para realizar el corte de los residuos puede ayudar a subsanar este inconveniente.
- Durante la manipulación de los *residuos cortados* en los experimentos preliminares, se observó que su manejo plantea serios inconvenientes para la producción de placas y paneles principalmente por su azaroso posicionamiento dentro de esos elementos constructivos, lo que podría ofrecer productos con características heterogéneas en los mismos.

- El uso de *residuos cortados* como agregados para la construcción se muestra como una aplicación interesante a manera de agregados aligerantes para mezclas de albañilería.
- El uso de *residuos molidos* resulta la de mayor beneficio para esta investigación y entre los dos tipos, el molido grueso (MG) se muestra como un material de composición más homogénea, con un predominio de perlas más grandes y menos afectadas por el proceso de molido.
- Si consideramos que las perlas más grandes tienen una mayor fase gaseosa que las perlas menores, podemos intuir que el uso del material MG resulta de mayor interés para esta investigación. Aún así, en la siguiente etapa se experimentará con los dos tipos de residuos de espuma de EPS, molidos y cortados analizados en esta prueba.

4.2 ENSAYOS PREPARATORIOS A LA ETAPA EXPERIMENTAL

4.2.1 EXPERIMENTACIÓN EXPLORATORIA DE MEZCLAS

4.2.1.1 Descripción

Dadas las características de la investigación, el trabajo experimental resulta esencial para el desarrollo de la tesis. Sin embargo el diseño de la experimentación propiamente dicha demandó de algunas actividades previas; entre ellas se encuentra la experimentación exploratoria que permite establecer en el mismo campo de experimentación la complejidad del trabajo a desarrollar y las necesidades del ensayo.

Las técnicas convencionales de reciclaje de EPS densifican y trituran el residuo hasta lograr gránulos muy pequeños que después son extruídos y son aprovechados como poliestireno sólido [GOODS01]. Con la intención de minimizar el daño a la estructura celular del residuo y conservar la mayor parte de sus características útiles como su baja densidad, se propone que la espuma se seccione con máquinas de alambre caliente o con sierras especiales.

Atendiendo a la idea anterior se decidió que para esta experimentación exploratoria el residuo de plástico se cortaría manualmente, buscando lograr cuerpos con las geometrías más fáciles de obtener según las formas del residuo de espuma original y que pudiesen ser contenidos en un cubo imaginario de 30 mm por lado. Una vez cortados los residuos se mezclan con el conglomerante y la masa que resulta se deposita en un molde que le dará su forma final.

4.2.1.2 Objetivos

Los objetivos de la experimentación exploratoria fueron los siguientes:

- Establecer con detalle los materiales y las herramientas necesarias para etapas posteriores.
- Observar las diferencias en resistencias entre las mezclas ensayadas.
- Establecer algunas comparaciones entre la estética de cuerpos endurecidos de conglomerante sin residuos de espuma de EPS y de muestras conteniendo residuos en diferentes proporciones.
- Certificar la viabilidad de la etapa experimental posterior.

4.2.1.3 Materiales y procedimiento

4.2.1.3.a Materiales

Los materiales usados fueron los siguientes:

- Yeso rápido (YR) o yeso de fraguado acelerado.

Es un producto de yeso constituido por sulfato cálcico semihidratado de elevada pureza. Usualmente se aplica como ligante para tabiquería interior y trabajos de albañilería en general.

Se clasifica como yeso de la categoría YG (yesos gruesos) según la norma UNE 102 010 y el Pliego General RY-85 (B.O.E. 100685)

- Escayola E-35

Es una escayola para la realización de elementos prefabricados y ligado de esos mismos elementos. Es un material de gran blancura.

Se clasifica como una escayola de fraguado normal según la norma UNE 102 011 y el Pliego General RY-85 (B.O.E. 100685)

- Residuos de espuma de EPS cortados según se describen en la tabla 4.1

4.2.1.3.b Equipo

Navaja

Regla metálica

Recipiente de plástico para amasado

Moldes de espuma de poliestireno con dimensiones de 40 x 160 x 200 mm (1280 cm³)

Vaso graduado con una capacidad máxima de 500 ml

Bastón de madera

Espátula de lámina

Balanza mecánica marca SOGO® con una graduación mínima de 5 g

Cronómetro marca Casio® con una graduación mínima de 0,01 s

4.2.1.3.c Procedimiento

1. Obtener residuos de espuma de EPS de contenedores de recogida municipal de forma aleatoria.
2. Cortar los residuos manualmente con navaja.

3. Pesar y medir los componentes de la muestra según las proporciones previamente establecidas en las tablas 4.6 y 4.7.
4. Depositar el conglomerante seco ya pesado en el contenedor de amasado.
5. Agregar el agua de amasado en la proporción indicada en las tablas 4.6 y 4.7.
6. Amasar la mezcla durante en tiempo marcado en las tablas 4.6 y 4.7.
7. Agregar a la mezcla los residuos cortados según las tablas 4.6 y 4.7.
8. Amasar la mezcla durante el tiempo necesario hasta lograr la impregnación total de los residuos.
9. Depositar la mezcla en el molde. Eliminar el exceso de material y aplanar la cara exterior de la bandeja con la espátula de lámina.
10. Dejar en reposo a la muestra por 12 horas.
11. Extraer las muestras y dejarlas 72 horas en reposo a temperatura ambiente en el laboratorio.
12. Pesar las muestras y asentar en el reporte del experimento.

Tabla 4.6 Fórmulas de las probetas usando Escayola como conglomerante

No. de muestra	Proporción en peso de agua en escayola seca (%)	Proporción de residuos de EPS con respecto a la capacidad del molde en volumen(%)	Tiempo de amasado (min)
1	60	sin residuos	3
2	80	sin residuos	4
3	60	25	3
4	80	25	3
5	60	50	4
6	80	50	4

Tabla 4.7 Fórmulas de las probetas usando Yeso rápido como conglomerante

No. de muestra	Proporción en peso de agua en yeso rápido (%)	Proporción de residuos de EPS con respecto a la capacidad del molde en volumen(%)	Tiempo de amasado (min)
7	60	sin residuos	2
8	80	sin residuos	3
9	60	25	3
10	80	25	3
11	60	50	4
12	80	50	4

4.2.1.4 Resultados de la experimentación exploratoria de mezclas

Una vez ordenada la información que se generó durante en experimento, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.8 Fórmulas individuales y masas obtenidas de las probetas usando Escayola como conglomerante

No. de muestra	Proporción en peso de agua en escayola seca (%)	Proporción de residuos de EPS en volumen con respecto a la capacidad del molde (%)	Peso de la muestra (kg)
1	60	sin residuos	1,565
2	80	sin residuos	1,295
3	60	25	1,184
4	80	25	0,981
5	60	50	0,802
6	80	50	0,667

Tabla 4.9 Fórmulas individuales y masas obtenidas de las probetas usando Yeso rápido como conglomerante

No. de muestra	Proporción en peso de agua en yeso rápido (%)	Proporción de residuos de EPS en volumen con respecto a la capacidad del molde (%)	Peso de la muestra (kg)
7	60	sin residuos	1,533
8	80	sin residuos	1,334
9	60	25	1,160
10	80	25	1,010
11	60	50	0,786
12	80	50	0,686

4.2.1.5 Análisis de resultados de la experimentación exploratoria de mezclas

Generalidades

Las características percibidas a simple vista (foto 4.5, 4.6 y 4.7) de las muestras como su color, textura, dureza, ligereza, y facilidad de moldeo entre otras cualidades, permiten intuir su potencial como productos para la construcción.

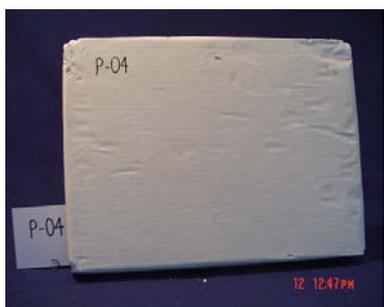


Foto 4.5



Foto 4.6



Foto 4.7

Foto 4.5 Cara de una probeta elaborada con residuos finos de EPS

Foto 4.6 Corte transversal de una probeta con residuos de EPS en cubos

Foto 4.7 Dorso de una probeta con residuos cortados de EPS en cubos

Se observa que al disminuir de peso, las muestras tienden a ser menos resistentes. Para disminuir esta desventaja las muestras se pueden reforzar en el interior o exterior de la pieza, con ello se observan además mejoras en su apariencia, en su facilidad de manejo y en su resistencia.

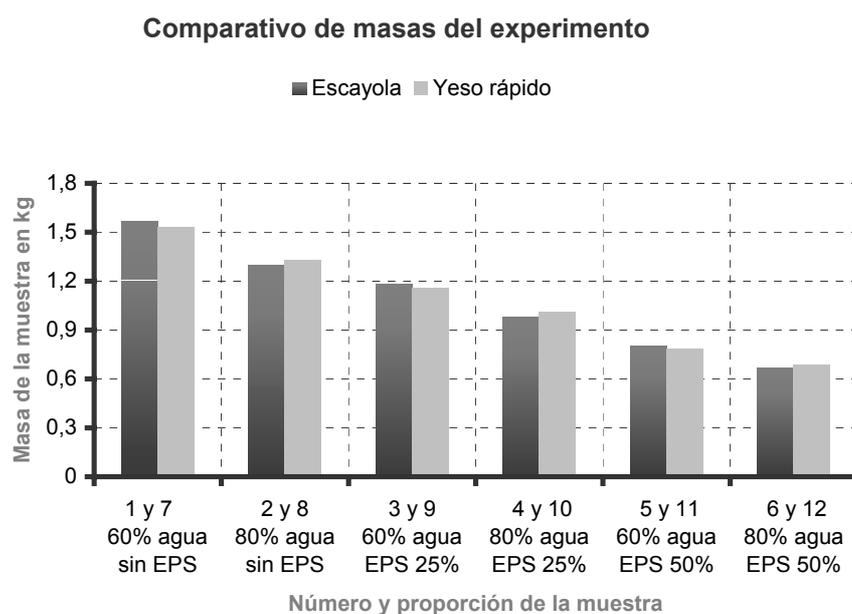
Acerca de las muestras obtenidas en el experimento

Es notable la ligereza obtenida en las muestras que contienen residuos, como lo indican los siguientes razonamientos:

Para el caso de la escayola con poca participación de agua (60%) en la mezcla y una alta presencia de residuos (un equivalente al 50% de la capacidad del molde) probeta No.5, se reportó una reducción de hasta 49% en el peso de la probeta, comparada contra una probeta sin espumas y con esa misma proporción de agua, probeta No. 1. (Gráfica 4.3).

Por otro lado para una mezcla con 80% de agua (probeta No. 6) la reducción fue del 48,5% comparada contra la probeta No. 2.

Para las mezclas fabricadas con yeso rápido se obtuvieron resultados muy similares (tabla 4.9).



Gráfica 4.3 Comparativo de las masas obtenidas para mezclas usando Escayola y Yeso rápido como conglomerante

Acerca de los componentes de las mezclas

Aunque sólo se han usado dos tipos de yeso y escayola convencionales, los conglomerantes usados en el experimento permiten intuir que ese tipo de materiales se distribuyen en cantidades manejables y que están disponibles para el ensayo. Además de que poseen las propiedades necesarias para ser usados en etapas posteriores de la investigación.

El corte de los residuos de espuma se plantea como un problema a atender. Si el corte no se hace cuidadosamente es fácil dañar la estructura celular arrancándola y deformándola. Así resulta conveniente analizar otras formas de acondicionamiento de las espumas, como el de cortarlo con máquinas de alambre caliente o el molerlo.

El tamaño del residuo (foto 4.7) es una variable de gran importancia en las propiedades de resistencia mostradas por las probetas durante el ensayo. Las muestras fabricadas con tiras cortadas de EPS presentaron serios problemas de impregnación, por lo que hubo de descartarse el uso de esta forma de residuos para la elaboración de probetas (foto 4.9). Los trozos con dimensiones mayores a 20 mm son difíciles de impregnar e integrar en una mezcla que se usará para formar placas o paneles (foto 4.10).

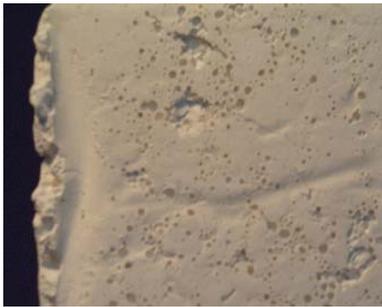


Foto 4.8



Foto 4.9



Foto 4.10

Foto 4.8 Detalle de una probeta fabricada con residuos finos y mezcla rica en agua

Foto 4.9 Lateral de una probeta fabricada con tiras cortadas de EPS

Foto 4.10 Probeta fabricada con residuos de EPS gruesos y mezcla rica en conglomerante

La cantidad de agua que se agrega a la preparación de la mezcla determina de manera importante algunas de las propiedades mecánicas y apariencia de las muestras. En el experimento se han manejado proporciones de agua de amasado y conglomerantes usuales en la industria de la construcción (60 y 80%). En etapas posteriores de la investigación se deberán explorar proporciones más altas de agua y residuos lo cual puede mejorar significativamente la relación peso-volumen del material explorado, pero por otro lado también habrá que observar la disminución de otras de sus propiedades como su resistencia mecánica y el aumento de la tendencia a absorber agua o humedad.

Acerca del proceso de fabricación de las muestras

En este experimento se obtuvieron muestras fabricadas por vaciado de las mezclas en moldes abiertos. Este procedimiento ofrece dos caras diferentes en las muestras: la cara interior del molde que copia fielmente las características del contenedor y la otra, la cara superior o dorso que es irregular si no hay una presión que regule el acomodo del conglomerante e impida la aparición de los residuos de espuma por flotación.

Al aumentar la viscosidad de las mezclas disminuye la flotación de los residuos. El material conglomerante al impregnar a los residuos y por su peso, coopera a desplazarlos a capas inferiores de la mezcla, sin embargo los cuerpos de mayores dimensiones entre los residuos cortados son más difíciles de mantener alejados de la capa superior de la probeta.

La determinación del tiempo de amasado requiere de un delicado balance. A mayor la proporción de residuos de espuma en una mezcla, se precisa de una mayor cantidad de agua para el amasado y por lo tanto aumenta también el tiempo necesario para lograr una buena

integración del plástico a la masa. Paralelamente al aumentar el tiempo de amasado también aumenta su viscosidad, primero poco a poco y después de forma muy acelerada, hasta que si esta supera un cierto punto resulta difícil impregnar los residuos de espuma.

De esta manera, la creciente viscosidad de la mezcla cuando se ha agregado el agua de amasado, la mayor o menor facilidad de conglutinar los residuos de EPS y la capacidad de la masa en estado plástico para copiar la forma del molde y formar un producto deseable, son puntos importantes a evaluar y resolver durante el proyecto.

Las propiedades mecánicas de un material describen el modo como éste responde a la aplicación de una carga. Para los materiales y las aplicaciones esperadas a desarrollar en esta tesis la aplicación de los ensayos de flexión, compresión y resistencia al impacto darán importante información acerca de sus comportamientos. Además cuantificar algunas propiedades de estos materiales, permitirá reconocer mejor sus usos potenciales con base a las observaciones hechas en este experimento preparatorio, los ensayos de densidad aparente, absorción de agua, conductividad térmica y comportamiento al fuego que se realizarán posteriormente en el capítulo 6.

4.2.1.6 Conclusiones de la experimentación exploratoria de mezclas

- De las características de las muestras obtenidas en el experimento, como su notable ligereza comparada contra los mismos materiales sin residuos y de su apariencia, se intuye que los materiales estudiados son potencialmente útiles para fabricar elementos de recubrimiento o de aislamiento para la construcción.
- Se percibe del experimento la necesidad de considerar el uso de refuerzos para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas que contienen residuos.
- El ensayo mostró que es posible combinar los elementos de las mezclas para lograr otros resultados que pueden ser de interés. Como por ejemplo, puede ser la fabricación de muestras en capas, con la posible aplicación de refuerzos externos que al mismo tiempo ofrezcan una decoración del elemento de construcción.
- Los materiales usados en la experimentación mostraron ser materiales adecuados que pueden ser considerados para su ensayo en etapas posteriores de la investigación.
- Se observó que del uso de los conglomerantes ensayados y con la integración de los residuos de EPS es posible obtener una gran variedad de texturas que pueden ser atractivas a la vista en un elemento constructivo.
- Del ensayo se deduce que las relaciones de agua usadas en la preparación de las mezclas (60% y 80%), pueden producir masas de viscosidad elevadas para los procesos comunes de producción de yeso o escayola. De aquí la conveniencia de experimentar relaciones de agua y conglomerante más elevadas (80% o más).
- Se ha observado que la flotación de los residuos de espuma puede ser un factor que produzca una tendencia a la fabricación de elementos constructivos de características heterogéneos.
- Los ensayos de corte de residuos de espuma señalaron la necesidad de seccionar las espumas por medio de instrumentos mecánicos menos agresivos para la estructura celular.
- El ensayo ha evidenciado la necesidad de obtener mayor homogeneidad en las características de los residuos usados.

- El experimento ha mostrado la importancia de obtener datos acerca de las características de los residuos usados para la fabricación de las mezclas, de cara a etapas posteriores de la investigación.
- El proceso de fabricación ensayado, indica la importancia en la determinación del tiempo de fraguado que permita impregnar o envolver a los residuos y al mismo tiempo que haga posible una distribución satisfactoria de la masa en el molde o en la laminadora.

5

**PRIMERA ETAPA
EXPERIMENTAL**

**MANEJO Y SELECCIÓN DE
MEZCLAS**



5 PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL. MANEJO Y SELECCIÓN DE MEZCLAS

5.1 MANEJO DE MEZCLAS

5.1.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MEZCLAS

5.1.1.1 Descripción

La experimentación es una de las partes de mayor importancia de esta tesis; una vez terminados los trabajos previos que se expusieron en el capítulo anterior, se procede ahora a la primera etapa experimental.

En esta etapa se ensaya con una amplia variedad de mezclas de residuos de espuma y de conglomerante de yeso o escayola, complementados con otros materiales auxiliares como cartón o almidón. Entre todos permiten disponer de numerosos modelos los cuales aportan información básica acerca de sus características, que más adelante se ha de usar para facilitar la toma de decisiones acerca de cuales entre todas las mezclas ensayadas, son las más adecuadas para las aplicaciones que se proponen en esta tesis y por lo tanto deben ser posteriormente investigadas con más profundidad.

También se fabrican algunos modelos de mezclas formuladas únicamente con conglomerante y agua de amasado que tienen como función principal la de servir de material de referencia o de comparación contra otras mezclas.

5.1.1.2 Objetivos de la experimentación

Con base a experiencias anteriores y sumadas a las que se producen en esta etapa, se busca lograr un conjunto de conocimientos acerca de las mezclas ensayadas que permite seleccionar a las mejores mezclas de acuerdo a las aplicaciones propuestas en esta investigación.

5.1.1.2.a Otros objetivos

- Observar el comportamiento de los residuos de espuma cortados o molidos durante la fabricación de las muestras.
- Observar el comportamiento de los residuos de espuma en mezclas formuladas con algunos de los yesos y escayolas disponibles en el mercado.
- Observar los comportamientos en la impregnación de los residuos, de fraguado y endurecido de las mezclas cuando se realizan formulaciones poco usuales en la construcción.

5.1.1.3 Metodología del experimento

El experimento se desarrolló en base al siguiente esquema:

- a. Recolección de la información pertinente al experimento

La información de interés para el experimento se obtuvo en su mayoría durante la etapa de investigación preliminar al cual se sumaron los datos obtenidos en el capítulo 4 de este documento.

- b. Planeación del experimento

El experimento se ha diseñado para observar de manera amplia la conducta de mezclas con diversas características de conglomerantes de yeso o escayola y residuos de EPS. Las principales variables a observar en las mezclas experimentadas se resumen en las siguientes:

- Cantidad de agua de amasado
- Cantidades y tipos de conglomerantes
- Porcentaje de participación y tipos de los residuos de espumas de EPS
- Tiempos de amasado

Considerando estas variables y con la participación de otros elementos secundarios como cartón, papel y adhesivos que se aplicaron de manera puntual, se procedió a establecer las mezclas a experimentar que se describen en el punto 5.1.1.3.b.

5.1.1.3.a Nomenclatura de las mezclas experimentales

A lo largo de esta tesis se manejan una gran cantidad de combinaciones de residuos de espuma, conglomerantes y materiales auxiliares en diversos tipos y proporciones. Para nombrarlos se ha usado una nomenclatura de fórmulas especial, que permite identificar en cada mezcla los materiales que la integran. También de manera opcional puede aparecer alguna otra anotación de importancia para su reconocimiento.

Los procesos detallados y cantidades para la fabricación de las mezclas aparecen en las órdenes de producción de cada material.

La manera de interpretar las mezclas ensayadas es la siguiente:

- a. Las mezclas tienen una clave numérica única que se le ha otorgado al momento de determinar las mezclas a estudiar y que es válida para todo el trabajo de tesis. Por ejemplo la mezcla número 42 o clave de mezcla 42.
- b. Cada mezcla describe sus componentes mediante una fórmula generalmente escrita de manera condensada, la cual se estructura por los elementos que forman el material compuesto (tabla 5.1) y que se escribe entre paréntesis cuando la fórmula contiene varias mezclas (tabla 5.2).

Tabla 5.1 Ejemplo de uso de la nomenclatura para una mezcla con un solo elemento

No. de mezcla	Explicación de la Fórmula	Fórmula condensada y fórmula extendida
42	Yeso controlado amasado con 120% de su peso en agua y mezclado con residuo molido grueso de EPS en un porcentaje del 2% del peso del yeso seco.	YC 100+A 120+MG 2 ó Yeso controlado 100%+Agua 120% + EPS Molido Grueso 2%

- c. Las fórmulas pueden tener uno o varios elementos; el primer elemento de la expresión de izquierda a derecha corresponde al tipo de conglomerante usado en peso y la proporción de agua que contiene en peso. Por ejemplo:

La expresión (YC 100+A 120) significa: Yeso Controlado al 100% amasado con una cantidad de agua equivalente al 120% del peso del yeso seco.

- d. El segundo elemento (MG 2) separado con un signo de más (+) del primer elemento, indica la inclusión del tipo (Molido Grueso) y cantidad de residuo de espuma de EPS, en un porcentaje para este caso del 2% del peso seco del yeso. El tipo de residuo de EPS usado en todas las fórmulas se abreviará con las siglas MG o MF, seguido del porcentaje de residuos que contiene cada mezcla en peso.

La cantidad de residuos de espuma de EPS que contiene la mezcla se obtiene de multiplicar el peso seco en gramos del conglomerante (yeso o escayola) por el porcentaje asignado para cada mezcla, que en esta fórmula es del 2%. Por ejemplo:

La mezcla número 42 con fórmula YC 100+A 120+MG 2, se elaboró con:

- Yeso Controlado: 1000 g + Agua: 1200 g (YC 100+A 120) +
- Residuos Molidos Grueso de EPS (MG 2): 20 g

El porcentaje de residuos de EPS usado (+MG 2) para la mezcla número 42 es de 2%. entonces: El 2% de 1000 g (de yeso) es: **20 g** (de residuos molidos gruesos de EPS). De esta manera, si cambiase la cantidad de yeso empleado en una mezcla, la cantidad en gramos utilizados de EPS cambia también, pero siempre corresponderá al 2% del peso del polvo en seco (YC) para esta fórmula.

Dada la baja densidad del residuo de EPS, esta cantidad expresada en gramos parece mínima, pero en volumen representa 2 222 cm³.

- e. El porcentaje usado de yeso o escayola en todas las fórmulas siempre representa el 100% en peso con respecto a los otros componentes.
- f. Cuando una mezcla contiene varios elementos o capas estos se separan con un signo (+). El orden en que se expresan, es el orden en que se fabrican y aplican en la cavidad del molde de la probeta. Así por ejemplo:

Tabla 5.2 Ejemplo de uso de la nomenclatura para una mezcla con varios elementos

No. de la mezcla	Explicación de la Fórmula	Fórmula condensada
32	Escayola amasada con 80% de su peso en agua + más escayola amasada al 90% de agua, mezclada con 1,08% de residuo molido grueso + más escayola amasada al 80% de agua. Probeta multicapas.	(E100+A 80) +(E100+A90+MG1,08) + (E100+A 80)

Clave o número de mezcla: 32

Fórmula condensada: (E 100+A 80) + (E 100+A 90+MG 1,08) + (E 100+A 80)

Significa:

- 1er. Elemento (E 100+A 80): Escayola al 100% en peso amasada con 80% de su peso en agua
- 2º. Elemento (E100+A 90+MG 1,08): Escayola 100% amasada con 90% de su peso en agua y mezclada con residuo molido grueso MG al 1,08% del peso de la escayola seca
- 3er. Elemento (E100+A 80): Escayola al 100% amasada con 80% de su peso en agua

g. Para expresar las fórmulas empleadas en los ensayos para cada mezcla, se usarán las fórmulas condensadas.

Para la lectura de las fórmulas que participan en los conjuntos de trabajo 1 al 8, se describen en la tabla 5.3 las abreviaturas correspondientes a cada componente usado. Un conjunto de trabajo es un grupo de mezclas de fórmulas similares, proporciones de sus componentes o procesos análogos, que se unen para ordenar la información relativa a su posterior análisis de resultados.

Tabla 5.3 Abreviaturas de los componentes aplicados en las fórmulas de las mezclas

Abreviatura	Descripción
YC	Yeso controlado
YR	Yeso rápido
E	Escayola E-35
A	Agua
PB	Papel bond 0,08 kg/m ²
PC	Papel cartón gris reciclado, espesor 0,45 mm
PK	Papel kraft 0,1 kg/m ²
FV	Velo de fibra de vidrio
AN	Almidón nativo en polvo
MG	Residuos molido grueso de espuma de EPS
MF	Residuo molido fino de espuma de EPS
C1	Residuo cortado de espuma de EPS, cubo de 1 cm
C2	Residuo cortado de espuma de EPS, cubo de 0,7 cm
C3	Tira cortada de espuma de EPS, 1 x 1 x 10 cm
C4	Tira cortada de espuma de EPS, 0,7 x 0,7 x 12 cm
C5	Residuo cortado de espuma de EPS, cubo de 1,5 cm

5.1.1.3.b Determinación de los conjuntos de trabajo

El proceso de determinación de las mezclas que participan en cada conjunto de trabajo siguió los siguientes pasos:

1. Determinar los elementos involucrados en las variables.
2. Establecer árboles de combinaciones con los elementos involucrados.
3. De los árboles de combinaciones obtener conjuntos de trabajo.
4. Determinar los objetivos específicos de que cada conjunto de trabajo.
5. Del árbol de combinaciones y de los objetivos de cada conjunto seleccionar las fórmulas que mejor lo representan.
6. Determinar el número de mezcla y establecer sus ordenes de producción, las cuales señalan con precisión sus materiales y forma de fabricación.

Los componentes de las muestras seleccionadas según su conjunto de trabajo se muestran de la tabla 5.4 a la tabla 5.11.

Todos los porcentajes expresados en las fórmulas son en peso con relación al peso seco del conglomerante usado (yeso o escayola). Cuando sea conveniente se expresarán las fórmulas de forma extendida. En algunas tablas y en el texto se usarán las fórmulas condensadas para no dificultar la lectura. Por su extensión, en algunas fórmulas se combinan las siglas de los componentes propias de esta tesis y el nombre completo de los componentes.

Tabla 5.4 Probetas elaboradas únicamente con conglomerante y agua al 60% y 80% en peso

CONJUNTO DE TRABAJO		1
No. de probeta	Fórmula	
1	Yeso Rápido 100 + Agua 60	
2-1	Yeso Rápido 100 + A 60	
2-2	Yeso Rápido 100 + A 60	
3-1	Escayola 100 + A 60	
3-2	Escayola 100+ A 60	
4	Yeso Controlado 100 + A 60	
5	Yeso Rápido 100+ A 60	
6	Yeso Rápido 100 + A 80	
7	Escayola 100 + A 80	
8	Escayola 100 + A 60	
9	Yeso Controlado 100 + A 80	
Probetas con tres tipos de conglomerante: Yeso Rápido, Yeso Controlado y Escayola, sin residuos de espuma de EPS. Conglomerantes amasados con agua al 60% y 80% en peso. Las probetas 1 a 3-2 están elaboradas como pruebas y por lo tanto no se usarán para los subsecuentes análisis. Se empieza a experimentar con el tiempo de amasado y con la viscosidad de la mezcla con relación a la cantidad de agua empleada.		

Tabla 5.5 Probetas elaboradas con conglomerante-agua, residuos en bajo porcentaje hasta 0,4%

CONJUNTO DE TRABAJO		2
No. de probeta	Fórmula	
10-1	Yeso Rápido 100 + A 60 + Molido Grueso 0,09	
11	Yeso Rápido 100 + A 80 + Molido Grueso 0,18	
12	Escayola 100 + A 60 + Molido Grueso 0,18	
13	Escayola 100 + A 80 + Molido Grueso 0,18	
14	Yeso Controlado 100 + A 80 + Molido Grueso 0,18	
15	Escayola 100 + A 60 + EPS Cortado1-0,16	
16	Escayola 100 + A 80 + EPS Cortado3-0,3	
17	Yeso Controlado 100 + A 80 + EPS Cortado3-0,18	
18	Yeso Rápido 100 + A 80 + EPS Cortado4-0,2	
19	Yeso Controlado100 + A 80 + EPS Cortado4-0,4	

Incorporación baja de residuos Molidos y Cortados de EPS de 0,09% al 0,4%. Uso de los tres tipos de conglomerante con proporciones de agua 60% y 80% en peso. Se experimenta con residuos cortados en cubos y en tiras de EPS.

Tabla 5.6 Probetas elaboradas en dos etapas (multicapas), agua 60 y 80%, residuos hasta 0,98%

CONJUNTO DE TRABAJO		3
No. de probeta	Fórmula	
20	(Yeso Controlado 100 + A 80) + (EPS MG 2,7) + (Yeso Controlado 100 + A 60)	
21	(Yeso Controlado 100 + A 80) + (Yeso Controlado 100 + A 60 + EPS Molido Fino 0,3)	
22	(Escayola 100 + A 60) + (Escayola 100 + A 80 + EPS Molido Grueso 0,36)	
23	(Escayola 100 + A 80) + (Escayola 100 + A 60 + EPS Molido Fino 0,79)	
24	(Yeso Rápido 100 + A 80) + (Yeso Rápido 100 + A 80 + EPS Cortado1-0,72)	
25	(Escayola 100 + A 80) + (Escayola 100 + A 80 + EPS Cortado4-0,9)	
26	(Yeso Controlado 100 + A 80) + (Yeso Controlado 100 + A 80 + EPS Cortado5-0,98)	
27	PB + (Yeso Controlado 100 + A 80 + EPS Molido Grueso 0,27) + (YC 100 + A 80 + EPS C5-0,36)	
28	Papel Kraft + (Escayola 100 + A 80) + (Escayola 100 + A 80 + EPS Cortado1-0,72)	
29	Papel Bond + (Yeso Rápido 100 + A 80 + EPS Molido Grueso 0,45) + Almidón Nativo	
30	Papel Bond + (Yeso Controlado 100 + A 80 + EPS Cortado1-0,49) + Almidón Nativo	
31	(Escayola 100 + A 80 + EPS Cortado3-0,45)	

Elaboración de probetas multicapas. Uso de proporciones medias residuos Cortados y Molidos del 0,3% hasta 0,98% en peso. Experimentación con Papel Bond, Papel Kraft y Almidón. El orden de la fórmula indica su posición dentro del molde de la probeta. Proporciones de agua de amasado del 60% y 80% en peso.

Tabla 5.7 Probetas elaboradas con dos y tres capas, agua 80, 90 y 100%; residuos hasta 1,08%

CONJUNTO DE TRABAJO		4
No. de probeta	Fórmula	
32	(Escayola 100 + A 80) + (Escayola 100 + A 90 + Molido Grueso 1,08) + (Escayola 100 + A 80)	
33	(Yeso Controlado 100 + A 80) + (YC 100 + A 80 + MG 0,9) + Fibra de Vidrio + (YC 100 + A 80)	
34	Papel Cartón + (Yeso Rápido 100 + A 80 + MG 0,54) + FV + (YR100 + A80 + MG 0,54) + PB + AN	
35	Papel Cartón + (Escayola 100 + A 90) + FV + (E 100 + A 80 + Cortado1 EPS 0,72) + PB + AN	
36	Papel Kraft + (E100 + A 90) + Papel Cartón + (Yeso Rápido100 + A 80 + MG 0,72) + PK + AN	
37	Papel Cartón + (E100 + A 80) + PK + (Yeso Controlado 100 + A 80 + MG 0,72) + PK + AN	

Elaboración de probetas con 3 capas o más. Combinación de Papel Cartón, Papel Kraft, Papel Bond entre capas. Uso de Fibra de Vidrio. Aumenta el porcentaje de residuos desde 0,54% hasta 1,08%. La proporción de agua de amasado es de 80% y 90%. Se combinan diferentes tipos de papel en una misma probeta y variantes en la cantidad de agua.

Tabla 5.8 Probetas elaboradas con agua hasta un 300% y aumento en la cantidad MG hasta 14,4%

CONJUNTO DE TRABAJO		5
No. de probeta	Fórmula	
38	Papel Bond + (Yeso Rápido 100 + A 80 + EPS Molido Grueso 1,1) + Almidón nativo	
39	Papel Bond + (Yeso Controlado 100 + A 100 + EPS Molido Grueso 1,45)	
40	Papel Bond + (Yeso Controlado 100+ A 100 + EPS Molido Grueso 1,8) + Papel Bond	
41	Papel Bond + (Yeso Controlado 100 + A 120 + EPS Molido Grueso 2)	
42	Papel Cartón + (Yeso Controlado 100 + A 120 + EPS Molido Grueso 2)	
43	(Escayola 100 + A 90) + (Yeso Controlado 100 + A 120 + EPS Molido Grueso 2)	
44	Papel Cartón + (Yeso Controlado 100 + A 120 + EPS Molido Grueso 3)	
45	Papel Cartón + (Escayola 100 + A 120 + EPS Molido Grueso 3)	
46	(Yeso Rápido 100+ A 200 + EPS Molido Grueso 5,4) + Papel Bond + Almidón nativo	
47	(Escayola 100 + A 300 + EPS Molido Grueso 7,2) + Papel Bond + Almidón nativo	
48	(Escayola 100 + A 300 + EPS Molido Grueso 14,4) + Papel Bond + Almidón nativo	
Aumenta la proporción de agua utilizada en las mezclas desde 80% hasta 300% en peso. Aumenta el porcentaje de residuos desde 1,1% hasta 14,4% en peso. Uso de Papel Cartón, Papel Bond y Almidón. Sólo se utiliza residuo molido grueso de EPS. Se experimenta con proporciones altas de residuos y de agua en una misma probeta para verificar la viscosidad, impregnación del residuo y fraguado.		

Tabla 5.9 Probetas de relación yeso-agua hasta 600% en peso y residuos hasta 35,1% en peso

CONJUNTO DE TRABAJO		6
No. de probeta	Fórmula	
49	(Yeso Rápido 100 + A 80 + EPS Molido Grueso 1,6) + Papel Bond + Almidón	
50	(Escayola 100 + A 80 + EPS Molido Grueso 1,6) + Papel Bond + Almidón	
51	(Escayola 100 + A 400 + EPS Molido Grueso 18) + Papel Bond + Almidón	
52	(Yeso Rápido 100 + A 80) + (YC 100 + A 200 + Molido Grueso 5,4) + Papel Bond + Almidón	
53	(Escayola 100 + A 100) + (Yeso Rápido 100 + A 100 + Molido Grueso 5,4) + Papel Bond + AN	
54	(Escayola 100 + A 500 + EPS Molido Grueso 32,4) + Papel Bond + Almidón	
55	(Escayola 100 + A 500 + EPS Molido Grueso 35,1) + Papel Bond + Almidón	
56	(Yeso Rápido 100 + A 600 + EPS Molido Grueso 44,1) + Papel Bond	
Características del grupo: El porcentaje de residuos Molido Grueso puede ir hasta 44,1% en peso. Experimentación con la proporción de agua hasta 600% en peso. Uso de Papel Bond + Almidón en todas las probetas. Se combinan diferentes conglomerantes en una misma probeta cuando son de dos capas.		

Tabla 5.10 Probetas (57 y 58) elaboradas para preforma que se aplicarán en las probetas 59 y 60

CONJUNTO DE TRABAJO		7
No. de probeta	Fórmula	
57	(Escayola 100 + A 500 + EPS Molido Grueso 32,4) + Papel Bond + Almidón nativo	
58	(Escayola 100 + A 500 + EPS Molido Grueso 32,4) + Papel Bond + Almidón nativo	
59	(Escayola 100 + A 80) + (Probeta 57) + (Escayola 100 + A 100)	
60	(Yeso Rápido 100 + A 200) + (Probeta 58) + (Yeso Rápido 100 + A 200)	
Características del grupo: Probeta 57 y 58 elaborada para preforma más delgada y ligera con un porcentaje de agua del 500% en peso y con 32,4% en peso de residuos molidos gruesos de EPS. Estas probetas se utilizarán para la elaboración de las probetas 59 y 60. Uso de escayola y yeso rápido únicamente.		

Tabla 5.11 Probetas elaboradas en una capa con papel y almidón, agua hasta 500% en peso y EPS molido fino y grueso hasta 27% en peso

CONJUNTO DE TRABAJO		8
No. de probeta	Fórmula	
61	(Escayola 100 + A 500 + EPS Molido Grueso 27) + Papel Bond	
62	(Escayola 100 + A 400 + EPS Molido Grueso 22,5) + Papel Bond	
63	(Escayola 100 + A 500 + EPS Molido Grueso 27) + Papel Bond + Almidón nativo	
64	(Escayola 100 + A 300 + EPS Molido Grueso 14,4) + Papel Bond + Almidón nativo	
65	(Escayola 100 + A 200 + EPS Molido Grueso 8,1) + Papel Bond + Almidón nativo	
66	(Escayola 100 + A 120 + EPS Molido Fino 6,4) + Papel Bond + Almidón nativo	
67	(Yeso Rápido 100 + A 80 + EPS Molido Fino 4,8) + Papel Bond + Almidón nativo	
68	(Escayola 100 + A 150 + EPS Molido Fino 7,7) + Papel Bond	
Experimentación con altos contenidos de agua hasta 500% en peso. Porcentajes altos de residuos molidos de 4,8% hasta 27% en peso. Uso del molido fino (MF) en algunas probetas. Todas las probetas llevan Papel Bond. Probetas de una sola capa.		

5.1.1.3.c Experimentos secundarios

Como se observa en las tablas anteriores, dentro de algunos de los grupos de interés y de manera simultánea, se realizaron pequeños experimentos que no están considerados en los objetivos principales de la tesis, y que son actividades de carácter exploratorio que dependiendo de sus resultados pueden o no continuar presentes en el proceso de la tesis.

a. Manejo de cartón y papel.

Desarrollado en los conjuntos de trabajo del 3 al 8.

Objetivos particulares:

- Observar el comportamiento de papel y cartón como refuerzos de los núcleos de yeso o escayola.
- Observar una serie de posibles resultados de la aplicación de almidón nativo como aditivo de unión entre los envoltentes y los núcleos.

b. Aplicación en las mezclas de productos similares preformados.

Desarrollado en el conjunto de trabajo 7.

Objetivos particulares:

- Observar la posible aplicación en los productos propuestos de una preforma fabricada con los mismos conglomerantes y residuos de espuma de EPS.

c. Aplicación de pequeñas cantidades de presión sobre las mezclas durante el fraguado.

Desarrollado en el conjunto de trabajo 8.

Objetivos particulares:

- Observar la presencia de conductas diferentes en las mezclas que en su proceso de fraguado han sido sometidas a pequeñas cantidades de presión constante.

Una vez establecidas las mezclas a producirse se procedió a su fabricación, la cual se realizó en el Taller del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la UPC.

El reporte de resultados del experimento secundario se muestra en los puntos 5.1.1.6 y 5.1.1.7 correspondientes a análisis de resultados y a conclusiones del experimento respectivamente.

5.1.1.4 Materiales y procedimiento

Los materiales usados en el experimento fueron los siguientes:

5.1.1.4.a Yesos y escayola

Se manejaron yesos gruesos (YG) o yeso de construcción y escayola (E); ambos materiales están regulados por el *Pliego general de condiciones de recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción RY-85* (Presidencia de Gobierno del 21 de marzo de 1985). Estos yesos están constituidos por sulfato de cálcico semihidratado y anhidrita II; antiguamente se les llamaba yesos negros, morenos o toscos. Pueden contener aditivos reguladores de tiempo de fraguado y es muy probable que los yesos usados en la experimentación y que denominamos “controlado” o de “fraguado lento” contengan estos modificadores. Sus usos comunes en la construcción se dan en el revestimiento y como conglomerante.

Por otra parte la Escayola esta constituida por sulfato cálcico semihidratado con la posible incorporación de aditivos reguladores de fraguado. Aquí se usa la escayola E-35 que se denomina Escayola especial, de mayor pureza que la escayola comercial E-30 y por lo tanto con mayor resistencia a la flexotracción [UNE102031]. La escayola usada puede incorporar reguladores de fraguado. Usualmente se emplea en trabajos decoración y en la fabricación de tabiques y elementos de techo, aunque también es usual que se utilice como adhesivo para la colocación de los prefabricados mencionados arriba.

Los materiales empleados en el experimento tienen las siguientes características:

Yeso controlado (YC)

Es un producto con base de yeso para guarnecido de divisiones interiores. Se aplica también como ligante en el levantamiento de tabiques de interiores.
Se clasifica como yeso de la categoría YG según la norma UNE102 010.

Yeso rápido o acelerado (YR)

Es un producto de yeso constituido por sulfato cálcico semihidratado de elevada pureza. Se aplica como ligante para tabiquería de interiores; se usa ampliamente en trabajos de albañilería en general.
Se clasifica como yeso de la categoría YG según la norma UNE102 010.

Escayola (E)

Es una escayola para la realización de elementos prefabricados y ligado de esos productos. Es una escayola de gran blancura.
Este material se produce con dos fórmulas con tiempos de fraguado ligeramente diferentes, de fraguado lento para usarse en trabajos de repaso y acabado o bien de fraguado rápido para la fabricación de elementos de la construcción.

Los materiales se adquirieron en una bodega convencional de materiales de construcción y no recibieron ningún trato especial en su traslado.

Durante el experimento los contenedores de yeso y escayola se mantuvieron dentro de sacos de plástico, cuidando de mantenerlos cerrados el mayor tiempo posible para no afectar las condiciones originales de envasado de los materiales, debido a la mayor o menor presencia de humedad en el ambiente.

5.1.1.4.b Agua de amasado

Para los experimentos se ha usado agua común limpia, cuidando que su temperatura al momento del experimento se mantenga a (23 ± 2) °C. Durante el invierno la temperatura del agua se reguló agregándole agua caliente hasta lograr los 23 °C. Fuera de esta restricción no se consideró la temperatura del agua de amasado como variable a atender en esta etapa experimental.

5.1.1.4.c Residuos de espuma de EPS

Para el experimento se usaron tanto residuos de espuma cortados como residuos molidos.

Los residuos de espuma cortados proceden de varios sitios, se recuperaron de contenedores urbanos y se identificaron sus usos originales como de embalajes de lavadora doméstica y de una impresora para ordenador personal y por su relación peso volumen se asume su densidad aparente es de (15 kg/m^3) . Otros residuos usados se obtuvieron de un saco de residuos de construcción, no se identificó su uso original y su densidad aparente parece ser de $(10-12 \text{ kg/m}^3)$. Se encontraron limpios por lo cual para su corte no hubo que lavarlos y simplemente se les retiró la capa de polvo que los residuos presentaban.

Los residuos se cortaron según las características de claves C1, C2, C3, C4 y C5 que se detallan en el punto 4.1.2.4 de esta tesis.

Los residuos molidos de espuma fueron una cortesía de Brafim S. A. y corresponden a las claves MG y MF y sus características pertenecen a las marcadas en el punto 4.1.3.3.a de esta tesis.

5.1.1.4.d Otros materiales

Los materiales que complementan los componentes de las probetas a experimentar son los siguientes:

- Papel bond color blanco de $0,08 \text{ kg/m}^2$ de densidad
- Papel cartón reciclado color gris de 0,45 mm de espesor
- Papel kraft color marrón de $0,1 \text{ kg/m}^2$ de densidad
- Velo de fibra de vidrio color blanco
- Almidón nativo en polvo

5.1.1.4.e Equipo

El equipo e instrumentos usados para el desarrollo del experimento fueron los que se describen:

Balanza de resortes con graduación mínima de 5 g y con capacidad máxima de 3 kg

Cronómetro marca Casio® con medición mínima de 0,01 s

Termómetro marca Protón® con graduación mínima de 0,1 °C y máxima de 25 °C

Molde de silicona con una cavidad de 30 x 160 x 247 mm (1.185,6 cm³)

Placa metálica de presión

Pesas metálicas con pesos diversos que van desde 100 g hasta 4 kg

Bastón de amasado manual

Herramienta de albañilería como espátulas, llanas y cucharones

Contenedores diversos de plástico para la medición, amasado y manejo de mezclas y materiales

5.1.1.4.f Procedimiento

Las muestras se produjeron a temperatura de laboratorio (23 ± 3) °C y todas se secaron al venteo dentro del mismo laboratorio.

Para la fabricación de las muestras se atendió a los tipos de mezclas previamente determinados en la estrategia del experimento y que se muestran de las tablas 5.4 a 5.11. Cada mezcla contó con una orden de producción que señala con precisión los materiales, cantidades y procedimientos particulares para la elaboración de la muestra.

La secuencia general de actividades para la fabricación de las muestras fueron las siguientes:

1. Preparar el molde de silicona.
2. Medir y habilitar los componentes de la muestra.
3. Mezclar el conglomerante a usarse y el agua de amasado.
4. Amasar según el tiempo de mezclado previamente determinado.
5. Agregar a la mezcla los residuos de espuma.
6. Amasar según el tiempo de amasado previamente determinado.
7. Vaciar la masa en el molde.
8. Colocar placa de presión y pesos (si así se señala en la orden de producción).
9. Una vez terminado el tiempo estimado de fraguado, extraer la muestra y disponer de ella para su período de endurecimiento.

5.1.1.5 Resultados del proceso de elaboración de mezclas

La fabricación de muestras se hizo basándose en la estrategia marcada al inicio del experimento. Sin embargo a lo largo de los trabajos y de acuerdo a las experiencias logradas,

la estrategia fue constantemente revisada y modificada; al final se produjeron en total 70 muestras correspondientes a 68 mezclas. Las masas y densidades de las muestras obtenidas se describen en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Masas y densidades de las probetas. Conjuntos de trabajo 1 al 8

No. probeta	Conjunto de trabajo	Fórmula	Peso Húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Pérdida de peso (%)	Densidad en seco (g/cm ³)	Densidad en seco (kg/m ³)
1	1	Yeso Rápido100+A 60	*	*	*	*	*
002-1	1	Yeso Rápido100+A 60	*	*	*	*	*
002-2	1	Yeso Rápido100+A 60	*	*	*	*	*
003-1	1	Escayola100+A 60	*	*	*	*	*
003-2	1	Escayola100+A 60	*	*	*	*	*
4	1	Yeso Controlado100+A 60	1,9	1,37	27,9	1,156	1156
5	1	Yeso Rápido100+A 60	1,92	1,42	26	1,198	1198
6	1	Yeso Rápido100+A 80	2,82	1,235	56,2	1,042	1042
7	1	Escayola100+A 80	1,78	1,2	32,6	1,012	1012
8	1	Escayola100+A 60	1,9	1,45	23,7	1,223	1223
9	1	Yeso Controlado100+A 80	1,78	1,25	29,8	1,054	1054
10	2	YR100+A 60 + MG 0,09	1,62	1,32	18,5	1,113	1113
11	2	YR100+A 80 + MG 0,18	1,58	0,96	39,2	0,81	810
12	2	E100+A 60 + MG 0,18	1,65	1,24	24,8	1,046	1046
13	2	E100+A 80 + MG 0,18	1,65	1,025	37,9	0,865	865
14	2	YC100+A 80 + MG 0,18	1,55	1,13	27,1	0,953	953
15	2	E100+A 60 + C1-0,16	1,61	1,205	25,2	1,016	1016
16	2	E100+A 80 + C3-0,3	1,31	0,88	32,8	0,742	742
17	2	YC100+A 80 + C3-0,18	1,45	0,98	32,4	0,827	827
18	2	YR100+A 80 + C4-0,2	1,475	0,995	32,5	0,839	839
19	2	YC100+A 80 + C4-0,4	1,475	0,955	35,3	0,805	805
20	3	(YC100+A 80)+(MG 2,7)+ (YC100+A 60)	1,26	1,01	19,8	0,852	852
21	3	(YC100+A 80)+ (YC100+A60+MF 0,3)	1,48	0,96	35,1	0,81	810
22	3	(E100+A 60)+ (E100+A80+MG 0,36)	1,58	1,08	31,6	0,911	911
23	3	(E100+A 80)+ (E100+A60+MF 0,79)	1,62	1,12	32,9	0,945	945
24	3	(YR100+A 80)+ (YR100+A 80 +C1-0,72)	1,41	0,9	36,2	0,759	759
25	3	(E100+A 80)+(E100+A 80+C4-0,9)	1,43	0,905	36,7	0,763	763
26	3	(YC100+A 80)+ (YC100+A80+C5-0,98)	1,36	0,91	33,1	0,768	768
27	3	PB+(YC100+A 80+MG 0,27)+ (YC 100+A 80+C5-0,36)	1,28	0,85	33,6	0,717	717
28	3	PK+(E100+A 80)+ (E100+A80+C1-0,72)	1,31	0,855	34,7	0,721	721
29	3	PK+(YR100+A 80+MG 0,45)+AN	1,45	0,965	33,7	0,814	814
30	3	PB+(YC100+A 80+C1-0,49)+AN	1,5	0,98	34,7	0,827	827
31	3	E100+A 80+C3-0,45	1,36	0,85	37,5	0,717	717

* Probetas de prueba declaradas nulas para análisis comparativo

continúa

Continúa la tabla 5.12

No. probeta	Conjunto De trabajo	Fórmula	Peso Húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Pérdida de peso (%)	Densidad en seco (g/cm ³)	Densidad en seco (kg/m ³)
32	4	(E100+A80)+(E100+A90+MG 1,8)+(E100+A80)	1,39	1,035	25,5	0,873	873
33	4	(YC100+A80)+(YC100+A80+MG 0,9)+FV+(YC100+A80)	1,42	0,965	32	0,814	814
34	4	PC+(YR100+A 80+MG 0,54) +FV+(YR100+A 80+MG 0,54)+ PB+AN	1,45	0,93	35,9	0,784	784
35	4	PC+(E100+A 90)+FV+(E100+A 80+C1-0,72)+PB+AN	1,36	0,87	36	0,734	734
36	4	PK+(E100+A 90)+PC+(YR100+A 80+MG 0,72)+PK+AN	1,32	0,89	32,6	0,751	751
37	4	PC+(E100+A 80)+PK+(YC100+A 80+MG 0,72)+PK+AN	1,3	0,875	32,7	0,738	738
38	5	PB+(YR100+A 80+MG 1,1)+AN	1,17	0,535	54,3	0,451	451
39	5	PB+(YC100+A 100+MG 1,45)	1,04	0,656	39,9	0,553	553
40	5	PB+(YC100+A 100+MG 1,8)	0,99	0,595	39,9	0,502	502
41	5	PB+(YC100+A 120+MG 2)	0,93	0,505	45,7	0,426	426
42	5	PC+(YC100+A 120+MG 2)	0,95	0,571	40	0,482	482
43	5	(E100+A 90)+(YC100+A 120+MG 2)	1,12	0,705	37,1	0,595	595
44	5	PC+(YC100+A 120+MG 3)	0,84	0,47	44	0,396	396
45	5	PC+(E100+A 120+MG 3)	0,87	0,49	43,7	0,413	413
46	5	(YR100+A 200+MG 5,4)+PB+AN	0,276	0,165	40,	0,139	139
47	5	(E100+A 300 + MG 7,2)+PB+AN	0,56	0,18	67,9	0,152	152
48	5	(E100+A 300+MG 14,4)+PB+AN	0,32	0,115	64,1	0,097	97
49	6	(YR100+A 80+MG 1,6)+PB+AN	0,775	0,623	20	0,526	526
50	6	(E100+A 80+MG 1,6)+PB+AN	0,69	0,5	27,5	0,422	422
51	6	(E100+A 400+MG 18)+PB+AN	0,39	0,14	64,1	0,118	118
52	6	(YR100+A 80)+(YC100+A200+MG 5,4)+PB+AN	0,89	0,52	41,6	0,439	439
53	6	(E100+A 100)+(YR100+A100+MG 5,4)+PB+AN	0,69	0,38	44,9	0,321	321
54	6	(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN	0,375	0,105	72	0,089	89
55	6	(E100+A 500+MG 35,1)+PB+AN	0,205	0,08	65,9	0,059	59
56	6	(YR100+A 600+MG 44,1)+PB	0,13	0,065	50	0,055	55
57	7	(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN	0,109	0,05**	54,1	**	**
58	7	(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN	0,07	0,03**	57,1	**	**
59	7	(E100+A 80)+(Probeta 57)+(E100+A100)	0,88	0,55	37,5	0,464	464
60	7	(YR100+A 200)+(Probeta 58)+(YR100+A 200)	0,77	0,49	36,4	0,413	413
61	8	(E100+A 500+MG 27)+PB	0,25	0,095	62	0,08	80
62	8	(E100+A 400+MG 22,5)+PB	0,26	0,07	73,1	0,059	59
63	8	(E100+A 500+MG 27)+PB+AN	0,249	0,102	59,1	0,086	86
64	8	(E100+A 300+MG 14,4)+PB+AN	0,345	0,12	65,2	0,101	101
65	8	(E100+A 200+MG 8,1)+PB+AN	0,445	0,216	51,5	0,181	181
66	8	(E100+A 120+MF 6,4)+PB+AN	0,555	0,323	45	0,273	273
67	8	(YR100+A 80+MF 4,8)+PB+AN	0,571	0,348	39	0,294	294
68	8	(E100+A 150+MF 7,7)+PB	0,560	0,28	50	0,236	236

5.1.1.6 Análisis de resultados del proceso de elaboración de mezclas

De los resultados obtenidos se puede extraer lo siguiente:

Acerca de los pesos y densidades obtenidas

La probeta de mayor peso seco de todas las fabricadas es la mezcla 8 (1,45 kg, densidad 1223 kg/m³), lo cual se explica debido a que está formulada únicamente con escayola y una participación baja de agua de amasado (60%). Esta muestra como otras de su tipo se produjeron para servir como elementos de comparación contra otras que sí integran residuos de espuma (conjunto de trabajo 1)

Entre las muestras más ligeras ya secas figuran la mezcla 56 (0,065 kg, densidad 55 kg/m³) y la mezcla 62. Esta ligereza se explica en ambos casos por su alto contenido de residuos y el uso de una fórmula rica en agua.

Aunque las probetas 57 y 58 se muestran como las más ligeras (0,05 y 0,03 kg), no se puede considerar su peso comparativamente con otras muestras, ya que se fabricaron como *preformas* para la elaboración de las probetas 59 y 60 y por lo tanto, su espesor es sustancialmente más delgado. Una preforma es uno de los elementos de una probeta multicapa que se ha fabricado con antelación y que constituye el cuerpo ligero de la mezcla (conjunto de trabajo 7)

De las probetas 10 a la 50 e incluyendo la probeta 67, son fórmulas que corresponden a la aplicación similar a placa de yeso estándar comercial. Excluyendo las probetas 46, 47 y 48, para ellas el promedio de densidad aparente (ρ) es de 724 kg/m³ lo que equivale a un 7% menos que la placa estándar (800 kg/m³); este dato sólo se debe de considerar como un indicador de que algunas de las mezclas reportan masas más elevadas que el producto comercial. Al observar la tabla 5.12 se percibe que muchas de las mezclas producidas con residuos están por debajo de la densidad del producto estándar de yeso laminado.

De la probeta 51 a la 66 incluyendo además a las probetas 46 a 48 son fórmulas que buscan acercarse a la densidad aparente (ρ) de la espuma de EPS (tipo III, 15 kg/m³). El promedio de densidad obtenido de las muestras señaladas es de 190 kg/m³ el cual resulta comparativamente muy elevado, sin embargo, la misma tabla señala que es posible lograr con los materiales que contienen residuos densidades aparentes de hasta 50 kg/m³ (mezcla 56) que resultan más atractivas, aunque no es el objetivo de esta investigación igualar o mejorar la densidad de un panel de EPS virgen estándar.

En cuanto a la relación que guarda el peso seco de la muestra contra el peso húmedo, el promedio de la totalidad de las muestras es cercano al 60%.

La pérdida promedio de agua del total de la muestras con relación a su peso al ser desmoldadas fue cercana al 40%. En este aspecto la pérdida más alta de agua en porcentaje de peso seco contra peso húmedo se dio en la mezcla 62 con 73,1% y la mínima pérdida con 18,5% de la mezcla 10. La pérdida de peso que se refleja en la tabla 5.12 indica la relación que existe entre la cantidad de residuos que incluye una mezcla y su peso seco y es uno de los factores que influye en la pérdida posterior de agua.

De los datos anteriores y de las fórmulas particulares de las mezclas señaladas se confirma que las mayores porcentajes de pérdida de humedad se dan en mezclas ricas en residuos de espuma (conjuntos de trabajo 5, 6 y 8).

Acerca de los comportamientos de los conglomerantes en la fabricación de las muestras

Yeso controlado

El manejo de proporciones de agua de amasado del 60% en peso presenta problemas de alta viscosidad para nuestros fines (mezcla 4). En estas mezclas el vaciado de la masa en el molde no se hace sólo por gravedad, ya que hay que empujar la masa para que caiga y después distribuirla uniformemente. Sin embargo, aunque su viscosidad sea alta, su plasticidad se mantiene por más tiempo antes de fraguar, lo que favorece el buen amasado y la buena impregnación de los residuos de espuma; esto es particularmente cierto para el caso de los residuos molidos (conjunto de trabajo 2).

En proporciones de agua de amasado de más de 80% en peso la masa se trabaja con más facilidad, lo que favorece también una mejor integración de los residuos de EPS. Por otro lado, se requiere de mayor tiempo para su fraguado y endurecimiento.

Si bien es cierto que al manejar relaciones ricas en agua de amasado y yeso controlado se obtienen masas de menor viscosidad, también requieren de un tiempo de fraguado más prolongado, lo que además resulta en la flotación de residuos de EPS que tienden a acomodarse en racimos y con ello posiblemente a formar un producto de características heterogéneas, como se observa en la mezcla 26.

Yeso rápido

El yeso de fraguado rápido en proporciones cercanas a 60% en peso de agua se maneja más favorablemente que el yeso controlado con la misma proporción. Sin embargo, la rápida ganancia de viscosidad de la masa dificulta la integración de los residuos de plástico, en especial para los residuos cortados (ver mezclas 15, 17, 19). Estas muestras tienen pequeños huecos, que se deben a que el rápido aumento de la viscosidad de la masa impidió que ésta fluyera satisfactoriamente a todos los rincones de la cavidad del molde.

En proporciones de más de 80% en peso de agua, la masa se maneja con notoria facilidad pero se muestra excesivamente fluida. Si la masa se deposita en la cavidad del molde con poco tiempo de amasado (2 minutos o menos), se observa una migración del exceso de agua al dorso de la muestra y que puede llegar a formar un delgado espejo de agua en mezclas muy ricas en este líquido.

En casos de mezclas con una proporción de 100% de agua de amasado o más, el fraguado y endurecimiento tomó más mucho tiempo que el resto de las muestras, lo que se puede atribuir a la sobresaturación de agua del conglomerante y que favoreció la aparición de deformaciones e inclusive fracturas en algunas muestras fabricadas con esas fórmulas (mezclas 46 y 56).

Escayola

Estos materiales con una proporción de 60% en peso de agua, mostraron una conducta satisfactoria por lo que toca a su viscosidad y manejo antes de agregar los residuos de espuma; el tiempo de amasado es muy corto (± 1 min), por lo cual el agregado de residuos de espuma y su impregnación ha de ser un proceso ser muy rápido.

En proporciones de 80% en peso o más de agua, la masa ha de amasarse ya con los residuos de espuma antes de depositarla en la cavidad del molde y así evitar que la masa llegue excesivamente fluida al molde y favorecer la flotación de los residuos.

El estudio permitió observar que si se usan proporciones mayores de 80% de escayola-agua de amasado, pero sin la presencia de residuos de espuma, se produce una fina capa de agua

en el dorso de la muestra. Una razón para esta migración puede ser la rápida saturación de la masa sin residuos durante el fraguado; la migración de agua puede disminuir probablemente debido a la absorción de agua por parte de los residuos de espuma, la cual migra casi totalmente al exterior durante el fraguado y el endurecimiento.

El proceso de amasado e integración de los residuos de espuma en la masa de conglomerante y agua

El amasado de las pastas se realizó manualmente con tiempos previamente determinados, aunque algunos de ellos se ajustaron durante el desarrollo del experimento debido a las características específicas observadas de los componentes de algunas muestras.

En la tabla 5.13 se observa que los tiempos necesarios para lograr una integración homogénea de los componentes oscilan entre 1 y 6 minutos de amasado, que depende de la fórmula particular de cada muestra, así como de la presencia o no de residuos de espuma. Este último hecho y la proporción de residuos presentes en la muestra, siempre aumenta el tiempo de amasado necesario para mezclar los componentes e impregnar a los residuos de espuma.

Tabla 5.13 Conductas de las mezclas experimentadas durante su amasado

Material	Cantidad de agua (%) en peso	Tiempo de amasado (min)	Comentarios
Yeso Controlado	60 o más	1 - 2	Difícil amasado Alta viscosidad
Yeso Controlado	80 o más	2 - 3	Viscosidad media
Yeso Controlado + residuos	80 o más	2 - 4	Difícil integración del residuo. Alta viscosidad
Yeso Rápido	60	1 - 2	Viscosidad media
Yeso Rápido	80	1 - 2	Muy Fluida. Saturada
Yeso Rápido + residuos	60	1 - 2	Fluida
Yeso Rápido + residuos	80 – 100	2 – 4	Difícil integración Rápido fraguado Viscosidad media
Yeso Rápido + residuos	Más de 100	2-4	Muy fluida. Saturada de agua. Endurecimiento excesivamente lento
Escayola	60	1	Viscosidad media
Escayola	80	2 - 3	Muy fluida. Saturada
Escayola + residuos	60 o menos	2 – 3	Difícil integración Rápido fraguado. Viscosidad media
Escayola + residuos	80 – 200	3 - 4	Difícil integración Rápido fraguado
Escayola + residuos	Más de 200	4 – 6	Muy difícil integración. Fraguado muy lento

Debido a la naturaleza hidrofóbica del poliestireno [ANAPE03], siempre es difícil lograr una unión satisfactoria con alguna sustancia que contenga agua (anexo A1, apartado A1.4.1.6) y que es el caso de esta investigación. Para solucionar el problema, se experimentó con varias alternativas para lograr una mezcla lo más homogénea posible y así evitar el desplazamiento de los cuerpos de EPS a la superficie de la probeta.

La integración de los residuos de espuma de EPS a la masa de la muestra se experimentó de dos maneras:

- a. Mezclar los residuos de espuma simultáneamente con los otros componentes de la mezcla al inicio del amasado.

Esta forma de integración se practicó tanto con los residuos molidos como con los residuos cortados. El principal problema observado en este proceso, fue la flotación de los residuos durante el amasado y que puede continuar aún dentro de la cavidad del molde ya depositada la masa (galería 5, foto 5.4).

Una manera para solucionar la flotación de los residuos y lograr una masa homogénea, fue la de amasar la mezcla hasta lograr un aumento de viscosidad tal, que fuese capaz de impregnar e integrar los residuos de espuma y posteriormente hacer el vaciado en la cavidad del molde. Esta operación requiere del conocimiento del momento óptimo para depositar la mezcla en el molde; esto es, que sea suficientemente viscosa para poder evitar la flotación de los residuos y al mismo tiempo que pueda moldearse satisfactoriamente (galería 5, foto 5.6).

Esta forma de amasado se usó principalmente en las muestras ricas en residuos de espuma (8,1% o mayores), como por ejemplo la mezcla 65, en la cual el conglomerante con agua se amasó por 2 minutos, para después agregar el residuo molido y continuar el amasado por 4 minutos más (conjunto de trabajo 8).

- b. Una forma más de integración de los residuos a la masa, fue la de colocar la espuma dentro de la cavidad del molde previamente al vaciado de la masa de conglomerante-agua.

Esta técnica se usó para la fabricación de muestras donde intervienen los residuos cortados con forma de tira (C3 y C4), los cuales se colocaron en el fondo de la cavidad del molde buscando formar una capa de espuma lo más homogénea posible (conjunto de trabajo 2) (galería 5, foto 5.2).

Se observó que esta técnica difícilmente logra impedir el desplazamiento de los residuos de espuma, en especial los de mayor tamaño; para ello se debe depositar la mezcla con una viscosidad notable lo que por otro lado no contribuye al correcto llenado de la cavidad. Se notó también que el uso de esta forma de integración de los residuos produce una capa superior de conglomerante muy delgada sobre los cuerpos de espuma, que inclusive por partes puede desaparecer, acarreando problemas de sujeción del plástico por parte de la masa o como se ve más adelante, disminuyendo la fuerza de sujeción del envoltorio de cartón o papel.

En las dos técnicas experimentadas y en varias muestras se aplicaron pequeñas cantidades de presión sobre la masa al inicio del fraguado, esto se logró colocando una placa metálica sobre la masa y sobre ella pequeñas pesas metálicas. Esto tiene dos objetivos:

1. Controlar la flotación de la espuma y conseguir muestras lo más planas posibles.
2. Simular un proceso común en la industria fabricante de paneles para cielos rasos de yeso.

Sin embargo el manejo de la presión no es una variable para atender en esta investigación.

Uso de cartón y papel

El uso de cartón y papel para la fabricación de algunas muestras de este experimento tiene como principal intención de facilitar el moldeo y el manejo de las mismas. No se pretende hacer un estudio específico de su participación en el producto, ya que esto excede los objetivos de la investigación (conjuntos de trabajo del 3 al 8).

Se busca aplicar estos materiales como refuerzo mecánico a la placa de yeso o al panel, a similitud de muchos de los usos de elementos constructivos de yeso o escayola ya disponibles en el mercado, donde la presencia de refuerzos aporta notables mejoras a las características de uso del producto, como puede ser su resistencias al fuego o al impacto.

En las mezclas donde se usaron envoltentes de cartón y papel, éstos se mojaron para después cortarse al tamaño final de la muestra, con lo cual se compensó la extensión del material por absorción de agua; finalmente se colocaron en la cavidad del molde.

Los comportamientos del cartón y papel fueron satisfactorios en lo que corresponde a sus funciones en las etapa de la fabricación de las muestras. Los papeles usados recibieron correctamente a la masa, no se rompieron ni modificaron de forma notoria su apariencia, salvo cuando se produjeron muestras ricas en agua, lo que provocó en los papeles pequeñas arrugas atribuibles a una absorción del exceso de agua procedente del fraguado de algunas mezclas. En el caso del cartón gris sólo se aprecian ligeras modificaciones en su apariencia como una suave decoloración.

Adhesión entre las muestras y los envoltentes de cartón o papel

Como se señala en la etapa de búsqueda de información, una sólida unión entre el envoltente de cartón o papel y el cuerpo endurecido, se muestra como un factor importante para reforzar mecánicamente un elemento de construcción de yeso o escayola para las aplicaciones que se proponen en esta investigación. También, la misma investigación apuntó al uso de diversos materiales como promotores de la unión entre el cartón o papel y el cuerpo de yeso o escayola y residuos de espuma de EPS (núcleo); muchas de ellas son sustancias patentadas o bien son fórmulas de producción interna en las empresas fabricantes de elementos constructivos de yeso como son los productores de placas de yeso. Así, es poca la información útil disponible para nuestros fines sin embargo, en base a la investigación de campo se sabe que son mezclas de almidón y aditivos, que tienen como objetivo favorecer la migración del adhesivo a las capas exteriores del núcleo y promover la formación de cristales del conglomerante enlazados con la fibras del cartón o papel mediante el aumento de temperatura del conjunto dentro de un horno. En esta investigación sólo se utilizó almidón nativo para la elaboración de algunas probetas.

El procedimiento utilizado fue el de agregar y disolver pequeñas cantidades de almidón simple en el agua de amasado (3 ml/l).

Los envoltorios usados tuvieron las siguientes características:

- Papel bond blanco de 0,080 kg/m²
- Cartón gris de reciclado con un espesor de 0,45 mm
- Papel kraft de 0,1 kg/m²

Los resultados de la prueba se clasificaron siguiendo los siguientes criterios:

Tabla 5.14 Criterios de calificación de la unión entre el núcleo y el envoltante

Calificación	Descripción
0	Nula El envoltante se desprende de la muestra sin necesidad de tirar de él
1	Pobre La unión es mínima y el envoltante se desprende con un tirón suave
2	Aceptable La unión es fuerte y homogénea, para desprender el envoltante hay que aplicar un tirón fuerte
3	Deseable Unión es fuerte y homogénea. Para desprender el envoltante previamente hay que practicarle dos cortes en cruz. Al aplicar un fuerte tirón se desgarran el envoltante.

En base a los resultados que se exponen en la tabla 5.15 del experimento, se puede confirmar que las muestras con altas proporciones de residuos de espumas de EPS muestran resultados de unión en lo general nulos o pobres, como son los casos de las muestras de la 55 a la 61. Esto se puede explicar del hecho que el yeso o la escayola son el vehículo de adhesividad, que al estar en contacto con grandes capas de plástico con poco conglomerante, la sujeción del envoltante es muy deficiente o no se produce (conjunto de trabajo del 3 al 8).

Por otro lado, en las probetas ensayadas ricas en conglomerante o donde el residuo tiene muy poco contacto con el envoltante, la unión se califica como *Aceptable* que ejemplifican los casos que se muestran (galería 5, foto 5.8).

Tabla 5.15 Calificaciones de los ensayos de aplicación de un adhesivo y papel

Clave de probeta	Fórmula	Recubrimiento	Calificación	Resultado
49	(YR100+A 80+MG 1,6)+PB+AN	Papel Bond	2	Aceptable
50	(E100+A 80+MG 1,6)+PB+AN	Papel Bond	2	Aceptable
51	(E100+A 400+MG 18)+PB+AN	Papel Bond	1	Pobre
52	(YR100+A80)+(YC100+A200+MG5,4)+PB+AN	Papel Bond	2	Aceptable
53	(E100+A100)+(YR100+A100+MG5,4)+PB+AN	Papel Bond	2	Aceptable
54	(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN	Papel Bond	2	Aceptable
55	(E100+A 500+MG 35,1)+PB+AN	Papel Bond	1	Pobre
56	(YR100+A 600+MG 44,1)+PB	Papel Bond	1	Pobre
57	(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN	Papel Bond	1	Pobre
58	(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN	Papel Bond	1	Pobre
59	E100+A 80+(probeta 57)+E100 100	Papel Bond	1	Pobre
60	YR100+A 200+(probeta 58)+YR 200	Papel Bond	1	Pobre
61	(E100+A 500+MG 27)+PB	Papel Bond	1	Pobre

Las probetas que aquí se listan se secaron al venteo dentro de la atmósfera de laboratorio. Este hecho puede afectar los resultados del ensayo, ya que de acuerdo con la investigación preliminar, se espera que el aumento de temperatura dentro del horno de secado mejore sustancialmente la unión entre el envoltante y el núcleo.

Se puede decir que el uso de almidón como adhesivo en este proyecto, es viable sólo para aquellos productos que se fabriquen ricos en conglomerante o tengan capas expuestas en contacto con los envoltentes hechas sólo de conglomerante. Este es el caso de la aplicación de residuos de EPS como aligerantes de placas de yeso.

Uso de preformados

Se han desarrollado dos pruebas (probetas 59 y 60) con preformas formuladas con proporciones muy altas de residuos molidos y conglomeradas con yeso o escayola ricos en agua. Se han fabricado con espesores menores a la cavidad del molde con un largo y ancho que coinciden con esa cavidad. Las preformas se han asentado sobre una capa de yeso o escayola que apenas ha iniciado su proceso de fraguado, para después ser recubiertas con un pasta muy fluida similar a la anterior (galería 5, foto 5.9).

Un problema observado durante el proceso de la muestra es que la preforma fabricada con una densidad muy baja (hasta 45 kg/m^3) tiende a flotar, aunque con menor fuerza que los residuos sin conglomerante. La probable razón para la flotación, es que para lograr penetrar el recubrimiento en la preforma ha de formularse la mezcla muy fluida y depositarse rápidamente en la cavidad del molde, de manera que conserve su viscosidad baja por largo tiempo, lo que provoca que sea incapaz de recubrir y retener a la preforma. Además, este exceso de agua en la mezcla de cobertura provocó deformaciones en la probeta durante el fraguado y se asume que son producidas por el reparto desigual de agua dentro de la pieza moldeada. Durante la manipulación de las muestras que resultaron, las preformas no parecen aportar beneficios sensibles de comportamiento mecánico a las mismas, debido principalmente a la poca unión que se logra entre capas (conjunto de trabajo 7).

Las ventajas teóricas de la presencia de una preforma dentro de las probetas se ven opacadas por la necesidad de un proceso más, que se suma al del moldeo del producto propiamente dicho y que lo convierte en una fabricación más lenta y laboriosa, comparada con las probetas que no contienen la preforma y que puede impactar decisivamente en el coste final del producto.

Aplicación de pequeñas cantidades de presión sobre las mezclas durante el fraguado

La aplicación de pequeñas presiones sobre las probetas busca simular algunos esfuerzos que sufren los materiales al ser laminados; además intenta mejorar el acabado del dorso de las probetas. Las presiones aplicadas fueron moderadas y nunca superaron los $0,025 \text{ kg/cm}^2$; éstas se sostuvieron sobre las muestras hasta que comenzó el endurecimiento del material.

La presión sobre materiales con altas proporciones de agua y residuos de espuma en su fórmula, provocó en repetidas ocasiones deformaciones o adelgazamientos en zonas de las probetas. Esto se atribuye a la absorción del líquido por el residuo y a la desigual distribución del EPS y del conglomerante en la muestra.

5.1.1.7 Conclusiones del proceso de elaboración de mezclas

Con respecto a las masas obtenidas

- Se ha podido comprobar que la mayor pérdida de peso húmedo se da en muestras con alta presencia de residuos en la mezcla, mientras que pérdidas menores de masa se

han dado en las muestras con las menores relaciones de agua de amasado y sin la presencia de residuos de EPS.

- Se ha constatado que es posible fabricar muestras de mezclas que contienen residuos de espuma acondicionados de diversas maneras y conglomerados con yeso o escayola con proporciones de agua de amasado inusuales en la construcción.
- Se ha constatado que es posible lograr mezclas secas con una densidad muy baja a través de preparar fórmulas que reúnen conglomerantes muy ricos en agua con altos porcentajes de residuos de espuma de EPS (galería 5, foto 5.7).

Con relación al uso de los conglomerantes examinados

- Los ensayos han evidenciado que el yeso controlado (YC) es un conglomerante que para ser moldeado acorde a los fines de esta tesis, se ha de formular con proporciones de agua iguales o mayores al 80% en peso.
- Por otro lado, se ha podido observar que las masas de YC con una relación de agua de 80% en peso o mayor resulta de más fácil manipulación pero como consecuencia, la lenta ganancia de viscosidad propia del material, permite la flotación de los residuos de espuma a las partes altas de la masa y con ello, un producto de características heterogéneas.
- Se ha observado en las muestras que la acelerada velocidad de fraguado del yeso rápido (YR) preparado con relaciones bajas de agua (60%), dificulta la integración de los residuos de espuma por su rápida ganancia de viscosidad.
- En relaciones de agua de amasado de más de (80%) con YR, la masa se muestra excesivamente fluida al momento de la preparación, lo que obliga a un amasado más prolongado previo al vaciado de la masa en el molde y que permite una correcta integración de los residuos de espuma.
- Durante la preparación de las muestras, la Escayola (E) mostró que en proporciones bajas de agua de amasado (60%), la masa resultante tiene una viscosidad inicial satisfactoria, pero el tiempo de amasado es muy corto o insuficiente para lograr una buena integración de los residuos de espuma.
- Por otro lado, la escayola (E) en proporciones de agua cercanas o mayores al 80% obligan a un período de amasado del conglomerante y los residuos de espuma antes de su vaciado en el molde; esto permite una mejor integración de los residuos y un moldeo satisfactorio (galería 5, foto 5.5).
- La escayola ha mostrado que es un conglomerante que permite la producción de masas con relaciones de agua de amasado más altas que los otros conglomerantes examinados (120% o más), pero como en los otros casos, esto obliga a aumentar el tiempo de amasado conforme aumenta la proporción de agua en la mezcla.

Con relación al amasado e integración de los residuos de espuma a la mezcla

- El estudio apuntó, que es conducta general en los conglomerantes estudiados en mezclas con baja cantidad de agua de amasado en peso (60%), formar masas de alta viscosidad y rápido fraguado que resultan difíciles de amasar, al tiempo que no permiten la integración de los residuos de espuma (galería 5, foto 5.1).

- En masas formadas con los conglomerantes en proporciones de 80% en peso o más, la viscosidad inicial disminuye facilitando su preparación y la integración de los residuos de espuma, pero ello también obliga a períodos de amasado más prolongados para impedir la flotación del plástico.
- Las técnicas de amasado estudiadas evidenciaron que la determinación del tiempo de amasado exitoso es un delicado balance entre la viscosidad inicial, la integración de los residuos y el tiempo de fraguado de la mezcla.

Con relación al uso de cartón y papel y su unión al núcleo fraguado (conjunto de trabajo 3 al 8)

- El uso de cartón o papel en las mezclas estudiadas puede aportar notables mejoras a las propiedades de las piezas obtenidas, sin embargo, lograr una unión eficaz entre las partes, es un estudio que supera los objetivos de esta tesis.
- La unión de los envoltentes de cartón o papel con las piezas con cuerpos fraguados como los estudiados, depende de varios factores:
 - a. La temperatura del proceso ha de ser suficientemente elevada (80 y 100 °C de temperatura exterior) para promover la unión con los adhesivos con los que se ha ensayado [PLANS04].
 - b. La zona de contacto entre el cartón o papel y el cuerpo fraguado ha de ser la mayor posible; esto es de difícil cumplimiento en algunas muestras muy ricas en espuma y que por su naturaleza no ofrecen una capa homogénea y plana.
 - c. El adhesivo o vehículo de la unión entre las dos partes de la muestra se encuentra disperso en la masa de yeso o escayola. Cuando la mezcla es rica en conglomerante, la unión puede darse al menos de forma aceptable; si ésta no es suficiente, como en el caso de las mezclas ricas en residuos de espuma, la unión no puede ser más que insatisfactoria.
 - d. Para la producción de muestras posteriores y para los efectos de esta tesis, resulta recomendable el uso de adhesivos externos comunes en la construcción.

Con respecto a la aplicación en las mezclas de productos similares preformados (conjunto de trabajo 7)

- Las ventajas teóricas de la presencia de una preforma dentro de las probetas, se ven disminuidas por la necesidad de un proceso más, que se suma al del moldeo del producto propiamente dicho, y que lo convierte en una fabricación más lenta y más laboriosa que aquellas probetas que no contienen la preforma y que además puede impactar decisivamente en el coste final del producto.

El uso de materiales preformados de productos similares a los que se proponen en este trabajo, se plantea como una interesante opción que sin embargo requiere de un más amplio trabajo de experimentación con otros conglomerantes y de refuerzos para las preformas, lo que queda excede los objetivos de esta tesis.

Con respecto a la aplicación de pequeñas cantidades de presión sobre las mezclas durante el fraguado (conjunto de trabajo 8)

- La aplicación de una presión moderada dota a las muestras con un mejor acabado, sin embargo, si la presión es excesiva (más de 0,025 kg/cm²) provoca notorias deformaciones en la probeta, por lo cual su uso posterior en la investigación debe hacerse cuidadosamente y a través de la información de los mismos ensayos.

Algunas conclusiones finales:

De la suma de las experiencias de este experimento, se ha comprobado que se pueden investigar con posibilidades de éxito las siguientes propuestas de aplicación para las mezclas investigadas:

- Como un elemento de construcción ligero con usos similares a una placa de yeso o escayola que contiene residuos de espuma de EPS.
- Como un elemento de usos similares a un panel de aislamiento térmico para la construcción. Fabricado con la cantidad mínima de conglomerante necesaria para conservarla como un cuerpo manejable y que se sumaría a otros productos para la construcción, como por ejemplo placas de yeso o de escayola o para laminado de otro material.

5.2 PROCESO DE SELECCIÓN DE MEZCLAS

5.2.1. DESCRIPCIÓN

El trabajo experimental con mezclas de residuos de espumas de EPS conglomeradas con yeso o escayola desarrollado hasta ahora, confirmó las posibilidades de aplicación de esas mezclas como:

- **Placas de yeso o escayola aligeradas o,**
- **Paneles para aislamiento térmico**

En esta etapa se busca seleccionar de entre las fórmulas estudiadas en la experimentación exploratoria de mezclas, las mezclas más adecuadas para las dos aplicaciones que se mencionan arriba.

5.2.2 METODOLOGÍA

Se requiere un proceso de selección de dos etapas para determinar de entre las numerosas mezclas obtenidas de la etapa de manejo de mezclas (5.1), sólo aquellas que presentan las conductas más adecuadas para las aplicaciones de placa de yeso o escayola con residuos de EPS y la de panel de residuos de EPS conglomerados.

5.2.2.1 Primera etapa de selección

5.2.2.1.a Objetivo

La primera etapa de selección tiene como fin obtener dos grupos reducidos de entre las probetas fabricadas en el apartado (5.1). Cada grupo contiene las mezclas con las mejores conductas de acuerdo a la aplicación de placa o de paneles constructivos que se ha determinado anteriormente en el apartado 5.2.1.

Algunas consideraciones para la primera etapa de selección son:

- No hay límite para la cantidad de muestras que forman cada grupo
- El total de las muestras a evaluar se dividen en dos conjuntos de acuerdo al material constructivo contra el que son comparados:

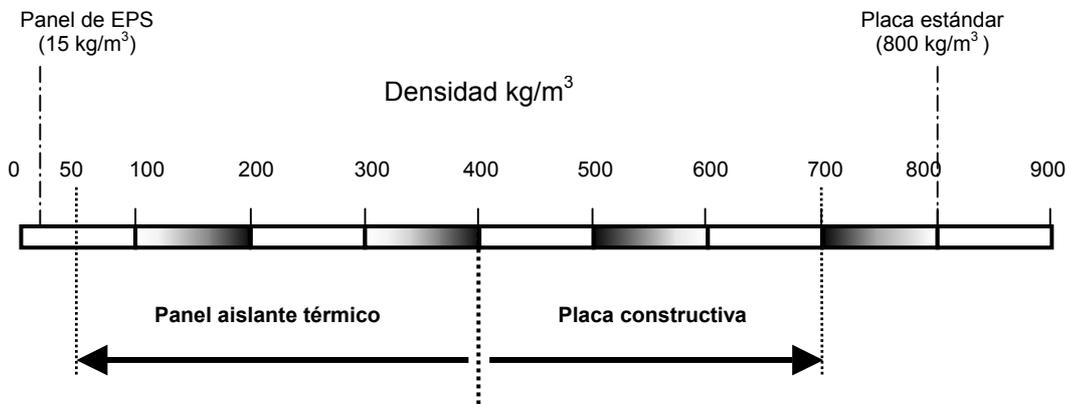


Figura 5.1 Densidades elegidas para la selección de mezclas de placa y panel para ensayos

El primer conjunto ubicado a la derecha en la figura, comprende mezclas cuya densidad es igual o mayor a 400 kg/m³ hasta 700 kg/m³ que corresponde una densidad que tiende a acercarse a la de la **placa** de yeso estándar. Estas muestras se comparan con una placa de yeso estándar comercial de 12,5 mm de espesor con densidad de (800 kg/m³). Por su densidad aquí incluyen las mezclas 10-50, 52, 59 y 60.

El segundo conjunto comprende mezclas con una densidad reportada menor a 400 kg/m³ hasta 50 kg/m³ que tienden hacia la densidad del EPS. Las muestras se comparan con un **panel** estándar de EPS del tipo III (densidad aparente de 15 kg/m³). Aquí se incluyen las muestras de la 51-68, 46-48.

- La evaluación es cualitativa por lo cual no se hace uso de instrumentos de medición.
- La cantidad de probetas (68) que hasta este punto maneja la investigación, hace necesario un proceso de selección de las mezclas de mayor interés de acuerdo a sus potenciales aplicaciones. Por sus características, el proceso que se ha diseñado presenta cierta carga de subjetividad, ya que toda la evaluación ha sido practicada por el autor de esta tesis. Se ha buscado disminuir esta carga subjetiva incorporando criterios de evaluación predeterminados y calificándolos de acuerdo a un valor numérico.

5.2.2.1.b Proceso de evaluación

El proceso de evaluación consistió otorgar una calificación en puntos para cada concepto de acuerdo a la tabla 5.16; después se sumaron todos los valores asignados a cada comportamiento por probeta y así determinar su calificación total. Los valores más altos fueron las fórmulas seleccionadas y que pasan a la segunda etapa de evaluación.

Tabla 5.16 Valores de calificación para la primera etapa de selección

Concepto	Valor en puntos
Inaceptable	0
Malo	1
Aceptable	2
Satisfactorio	3

Para cada Concepto se establecen los criterios de calificación y que son los siguientes:

Concepto: **Comportamiento durante su manejo**

La probeta se mantiene íntegra después de aplicarse las siguientes pruebas:

- El evaluador con sus dos manos intenta flexionar la probeta por su eje transversal
- El evaluador con su dedo pulgar aplica una pequeña presión sobre una esquina de la superficie de la probeta
- El evaluador deja caer la probeta en posición horizontal desde una altura de 5 cm.

Concepto: **Peso en base a su densidad**

- Se practica una comparación entre las densidades del material comercial con la de la probeta que se trate. La mejor calificación corresponde a la densidad más baja.

Concepto: **Facilidad de Fabricación**

La calificación se otorga en base a la facilidad o complejidad de:

- El número y preparación de componentes
- Tiempo de amasado e integración de los residuos
- Facilidad para el moldeo y extracción de la probeta
- Duración del tiempo de fraguado y endurecimiento

Concepto: **Apariencia**

La evaluación la otorga el evaluador en base a las siguientes características formales de las probetas:

- Planeidad y ángulos rectos
- Cantos finos y completos
- Color del núcleo de yeso o escayola
- La homogeneidad y tersura de la cara
- Textura plana y homogénea del dorso de la probeta

5.2.2.1.c Resultados de la primera etapa de selección

Una vez practicada la evaluación del total de las probetas ahora las mezclas con puntuaciones más altas son las que son consideradas para la segunda etapa. Los materiales con residuos se organizan dos tablas de acuerdo al uso que se propone para cada grupo, placa o panel, y el material comercial con el que son comparados:

Tabla 5.17 Número de probeta y su evaluación según cada criterio comparada con la placa de yeso estándar

Probeta	Fórmula	Manejo	Densidad	Fabricación	Apariencia	Total
40	PB+(YC100+A 100+MG 1,8)+PB	2	3	2	2	9
41	PB+(YC100+A 120+MG 2)	2	3	2	2	9
42	PC+(YC100+A 120+MG 2)	2	3	2	2	9
43	(E100+A 90)+(YC100+A120+MG 2)	2	3	1	3	9
44	PC+(YC100+A 120+MG 3)	2	3	2	2	9
45	PC+(E100+A 120+MG 3)	2	3	2	3	10
49	(YR100+A 80+MG 1,6)+PB+AN	2	3	2	3	10

Los materiales seleccionados para placa se muestran en la tabla 5.17 y los seleccionados para panel se muestran en la tabla 5.18 (galería 5, fotos de la 5.10 a la 5.24).

Tabla 5.18 Número de probeta y su evaluación en puntos según cada criterio comparada con un panel de espuma de EPS

Probeta	Fórmula	Manejo	Densidad	Fabricación	Apariencia	Total
54	(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN	1	3	1	3	8
55	(E100+A 500+MG 35,1)+PB+AN	1	3	1	3	8
61	(E100+A 500+MG 27)+PB	1	3	1	3	8
62	(E100+A 400+MG 22,5)+PB	1	3	1	3	8
63	(E100+A 500+MG 27)+PB+AN	1	3	1	3	8
64	(E100+A 300+MG 14,4)+PB+AN	1	3	1	3	8
65	(E100+A 200+MG 8,1)+PB+AN	2	3	2	3	10
66	(E100+A 120+MF 6,4)+PB+AN	2	3	2	3	10

La tabla 5.19 resume los números de las probetas seleccionadas que pasa a una segunda evaluación:

Tabla 5.19 Mezclas seleccionadas para cada aplicación propuesta de placa y de panel

Aplicación propuesta	Mezclas seleccionadas
Grupo 1 Placas de yeso o escayola aligeradas	40, 41, 42, 43, 44, 45, 49,
Grupo 2 Paneles de aislamiento térmico	54, 55, 61, 62, 63, 64, 65, 66

5.2.2.2 Segunda etapa de selección

5.2.2.2 a Objetivo

Por medio de un nuevo proceso de evaluación, las mezclas seleccionadas en el proceso 5.2.2.1 y que se muestran en la tabla 5.19 se reducen aún más y se convierten en dos pequeños conjuntos de mezclas.

Las fórmulas que resultan de esta segunda etapa de selección se aplican en la fabricación de muestras y probetas que corresponden a las Normas de los productos comerciales con los que se compara cada grupo, después las probetas son ensayadas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la UPC y en otros laboratorios de la misma Universidad.

Algunas consideraciones para la segunda etapa de selección de mezclas:

5.2.2.2.b Método

El método seguido para la evaluación fue el siguiente:

- La evaluación exige calificar cada comportamiento con una escala entre 0 y 5 de acuerdo a un grupo de criterios para cada conducta. Se pueden otorgar calificaciones con números enteros o fracciones.
- La calificación la emite el evaluador de acuerdo al grado de satisfacción del grupo de criterios de cada comportamiento.
- La calificación emitida por el evaluador se multiplica por un factor numérico fijado de antemano (tabla 5.20). Cada resultado parcial se suma a los demás obtenidos por la misma probeta en otras conductas.
- Los candidatos con calificaciones más altas se consideran los más altos para cada aplicación (ver tablas 5.21 y 5.23).

5.2.2.2.c Materiales y equipo

Las probetas que se señalan en la tabla 5.19

Los materiales de comparación descritos en el punto 5.2.2.2.a

Balanza electrónica con una exactitud de $\pm 0,1$ g marca Sartorius®

Vernier o pie de rey con una precisión de 0,1 mm marca Mitutoyo®

Navaja

Regla plana

Serrucho recto de diente fino

5.2.2.2.d Proceso de evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 1 Placas de yeso o escayola con residuos de EPS

Los conceptos a evaluar y sus criterios son los siguientes:

Concepto: **Peso**

- Comparación del peso en kg/m^2 de una placa de yeso laminado estándar con el peso de una placa del mismo espesor fabricada con la mezcla a evaluar.
- Los pesos más ligeros obtienen las mejores calificaciones.

Concepto: **Facilidad de Fabricación**

La calificación se otorga con base en la información obtenida en la investigación preliminar de la tesis, a las experiencias obtenidas durante la elaboración de las probetas, la información colectada durante las visitas a las canteras de yeso y a fabricantes de placas de yeso y a entrevistas con el personal de esas empresas [PLANS04].

La calificación se otorga en base a la facilidad o complejidad de:

- El número y preparación de componentes
- Viscosidad de la masa, tiempo de amasado e integración de los residuos
- Moldeo y extracción de la probeta
- Duración del tiempo de fraguado y endurecimiento

Concepto: **Maquinabilidad**

La calificación se otorga de acuerdo al comportamiento que guardan las probetas al efectuar el siguiente procedimiento:

1. Sobre cara lisa de la probeta con navaja efectuar un corte recto con una profundidad aproximada de 4 mm a todo lo ancho de la probeta.
2. Colocar la cara opuesta de la probeta donde se realizó el corte sobre el borde de una mesa donde el corte esta de forma paralela y justo sobre el borde de la mesa
3. Aplica una fuerza con las manos sobre cada lado del corte lo que puede resultar en un rompimiento recto (como el que se produce en una placa de yeso comercial) o en una fractura ramificada o puede no producirse el rompimiento.

Las evaluaciones más altas corresponden a formas de rompimiento similar a los de una placa de yeso laminado estándar como la que se describe al inicio de la evaluación. Si no se produce rompimiento la calificación es baja.

Concepto: **Apariencia**

La evaluación la otorga el evaluador en base a las siguientes características formales de las probetas:

- Planeidad y ángulos rectos
- Cantos y aristas. Finos y completos
- Poros abiertos o residuos de EPS expuestos en cara o dorso
- Color del núcleo de yeso o escayola
- La homogeneidad y tersura de la cara
- Textura suave y homogénea del dorso de la probeta

Concepto: **Resistencia**

Una placa de yeso estándar de yeso laminado estándar ofrece una combinación balanceada de flexibilidad y dureza, aquí se aplican sobre las probetas dos ensayos sencillos de ambas propiedades sólo con fines de evaluación y selección:

La probeta se mantiene íntegra después de aplicarse las siguientes pruebas:

- Flexión a tres puntos

La probeta con su cara hacia abajo se coloca centrada y de forma transversal a dos apoyos metálicos paralelos y separados 20 cm uno del otro después aplica una fuerza de 7 kg por medio de pesos de metal al centro de la probeta. El evaluador mide con el vernier la flecha máxima que se produce. A la mayor medición de flecha obtenida se le otorga la calificación más alta.

- Dureza superficial

Una bola de acero de 10 mm \varnothing se coloca sobre la cara suave de la probeta y sobre ella se aplica con pesas de metal una fuerza equivalente a 10 kg y se mantiene la carga durante 10 s.

El evaluador marca con lápiz la huella que produce la bola de acero y mide con vernier su diámetro. El mayor diámetro obtiene la menor calificación.

Concepto: **Coste**

Para esta parte de la evaluación se practicó un pequeño estudio de los costes de las probetas evaluadas. El estudio es sólo una sumatoria de los costes de material necesarios para fabricar 1 m² con un espesor de 13 mm de la mezcla que se evalúa y no tiene otro fin que poder establecer una comparación con el coste de una placa de yeso laminado estándar de las mismas medidas. El porcentaje más alto que resulta de la comparación recibe la calificación más baja.

Los factores numéricos usados en esta evaluación son los siguientes:

Tabla 5.20 Criterios de evaluación y factores numéricos aplicados de **placa**. Grupo 1

Criterio	Factor numérico
Peso comparado contra materiales comerciales similares	8
Facilidad de fabricación	8
Maquinabilidad	8
Apariencia	9
Resistencia	9
Coste comparado contra materiales comerciales similares	7

5.2.2.2.e Resultados de la evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 1

Las mezclas seleccionadas para **placa** son las cuatro con las calificaciones más altas. El total de las puntuaciones obtenidas por las probetas se muestran en la tabla 5.21.

Tabla 5.21 Aportación en puntos por cada criterio por mezcla evaluada de **placa**. Grupo 1

No de mezcla	Peso vs otro			Fabricación			Maquinabilidad			Apariencia			Resistencia			Coste vs otro			Total
	C	F	A	C	F	A	C	F	A	C	F	A	C	F	A	C	F	A	
40	1	8	8	2	8	16	3	8	24	3	9	27	4	9	36	3	7	21	132
41	2	8	16	2	8	16	3	8	24	4	9	36	4	9	36	3	7	21	149
42	2	8	16	3	8	24	4	8	32	3	9	27	4	9	36	3	7	21	156
43	1	8	8	2	8	16	3	8	24	4	9	36	3	9	27	3	7	21	132
44	3	8	24	3	8	24	4	8	32	3	9	27	3	9	27	3	7	21	155
45	2	8	16	4	8	32	4	8	32	3	9	27	3	9	27	4	7	28	162
49	2	8	16	4	8	32	3	8	24	4	9	36	4	9	36	5	7	35	179

En la tabla 5.2.1 se muestran las calificaciones obtenidas para cada probeta de **placa** evaluada donde la letra C indica la calificación individual, la letra F indica el factor numérico asignado por concepto y la letra A resulta de la multiplicación de la columna C y la columna F. Todas las aportaciones (columnas A) se suman para obtener el valor total de la mezcla.

5.2.2.2.f Proceso de evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 2 Paneles de residuos de EPS conglomerados

Los conceptos a evaluar y sus criterios son los siguientes:

Concepto: **Densidad aparente**

Comparación de la densidad de cada mezcla en kg/m^3 con la del EPS estándar de tipo III (15 en kg/m^3). La densidad más baja recibe la calificación más alta.

Concepto: **Facilidad de Fabricación**

En este concepto no es posible una comparación entre el material con residuos conglomerados y el EPS dado que son sistemas de producción diferentes.

La calificación se otorga en base a la facilidad o complejidad de fabricación de la mezcla evaluada de aquí los siguientes criterios:

- El número y preparación de componentes
- Viscosidad de la masa, tiempo de amasado e integración de los residuos
- Moldeo y extracción de la probeta
- Duración del tiempo de fraguado y endurecimiento

Concepto: **Maquinabilidad**

La calificación se otorga de acuerdo al comportamiento que guardan las probetas al efectuar el siguiente procedimiento:

1. Sobre cara de la probeta con un serrucho de diente fino cúter efectuar tantos cortes rectos sobre el eje transversal como sean necesarios para alcanzar el eje de probeta.
2. Colocar la cara opuesta de la probeta donde se realizó el corte sobre el borde de una mesa donde el corte esta de forma paralela y justo sobre el borde de la mesa
3. Aplica una fuerza con las manos sobre cada lado del corte lo que puede resultar en un rompimiento recto (similar al que se produce en un panel virgen de EPS) o en una fractura ramificada.

Las evaluaciones más altas a las probetas corresponden a formas de rompimiento similar a los de un panel de EPS con las mismas dimensiones y cortado de la misma manera que la descrita: un rompimiento sonoro que tiende a seguir el corte de origen y con pocas partículas desprendidas durante la fractura.

Concepto: **Apariencia**

La evaluación la otorga el evaluador en base a las siguientes características formales de las probetas:

- Planeidad y ángulos rectos
- Cantos y aristas completos
- Color de la probeta
- Distribución homogénea del conglomerante
- La homogeneidad y tersura de la cara

Concepto: **Resistencia**

Se aplican sobre las probetas un ensayo sencillo sólo con fines de evaluación y selección.

La probeta se mantiene íntegra después de aplicarse la siguiente pruebas:

- Flexión a tres puntos

La probeta con su cara hacia abajo se coloca centrada y de forma transversal a dos apoyos metálicos paralelos y separados 20 cm uno del otro, después aplica una fuerza de 0,5 kg por medio de un peso de metal al centro de la probeta. El evaluador mide con el vernier la flecha máxima que se produce. Después de 10 min de retirarse el peso la probeta recupera su planeidad.

A la mayor medición de flecha obtenida con una recuperación total del esfuerzo se le otorga la calificación más alta.

Concepto: **Coste**

Para esta parte de la evaluación se practicó un pequeño estudio de los costes de las probetas evaluadas. El estudio es sólo una sumatoria de los costes de material necesarios para fabricar 1 m³ de la mezcla que se evalúa y no tiene otro fin más que poder establecer una comparación porcentual con el coste de 1 m³ de EPS con densidad de 15 kg/m³. La relación más baja que resulta de la comparación del coste obtenido para la probeta y el coste del EPS virgen resulta con la calificación más alta.

Los factores numéricos usados en la evaluación del grupo 2 son los siguientes:

Tabla 5.22 Criterios de evaluación y factores numéricos aplicados de **panel**. Grupo 2

Criterio	Factor
Peso comparado contra materiales comerciales similares	10
Facilidad de fabricación	8
Maquinabilidad	9
Apariencia	8
Resistencia	9
Costo comparado contra materiales comerciales similares	7

5.2.2.2.g Resultados de la evaluación de la segunda etapa de selección. Grupo 2

Las mezclas seleccionadas son las cuatro con las calificaciones más altas. El total de las puntuaciones obtenidas por las probetas se muestran en la tabla 5.23.

Tabla 5.23 Aportación en puntos para cada criterio por mezcla evaluada de **panel**. Grupo 2

No de mezcla	Peso vs otro			Fabricación			Maquinabilidad			Apariencia			Resistencia			Coste vs otro			Total
	C	F	A	C	F	A	C	F	A	C	F	A	C	F	A	C	F	A	
54	2	10	20	3	8	24	2,5	9	22,5	4	8	32	2	9	18	2	7	14	130,5
55	3	10	30	3	8	24	3	9	27	4	8	32	2,5	9	22,5	4	7	28	163,5
61	2,5	10	25	3	8	24	3	9	27	4	8	32	3	9	27	3	7	21	156
62	3	10	30	3	8	24	3	9	27	4	8	32	3	9	27	3	7	21	161
63	1	10	10	3	8	24	4	9	36	3,5	8	28	4	9	36	3	7	21	155
64	3	10	30	3	8	24	4	9	36	3,5	8	28	4	9	36	5	7	35	189
65	1	10	10	3	8	24	4	9	36	3	8	24	4	9	36	5	7	35	165
66	0,5	10	5	2	8	16	5	9	45	3	8	24	4,5	9	40,5	4	7	28	158,5

En la tabla 5.2.3 se muestran las calificaciones obtenidas para cada probeta evaluada para **panel** donde la letra C indica la calificación individual, la letra F indica el factor numérico asignado por concepto y la letra A resulta de la multiplicación de la columna C y la columna F. Todas las aportaciones (columnas A) se suman para obtener el valor total de la mezcla.

5.2.3 CONCLUSIONES DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE MEZCLAS

De las tablas 5.21 y 5.23 las primeras cuatro mezclas mejor calificadas de cada grupo han sido seleccionadas para su desarrollo durante la investigación de tesis. De esta manera se forman dos grupos, uno para **placa** y el segundo para **panel**:

Tabla 5.24 Mezclas seleccionadas de placa y panel para ensayarse en el laboratorio

Aplicación propuesta	Mezclas seleccionadas
Grupo 1 Placas de yeso o escayola aligeradas	42, 44, 45, 49
Grupo 2 Paneles de aislamiento térmico	55, 64, 65, 66

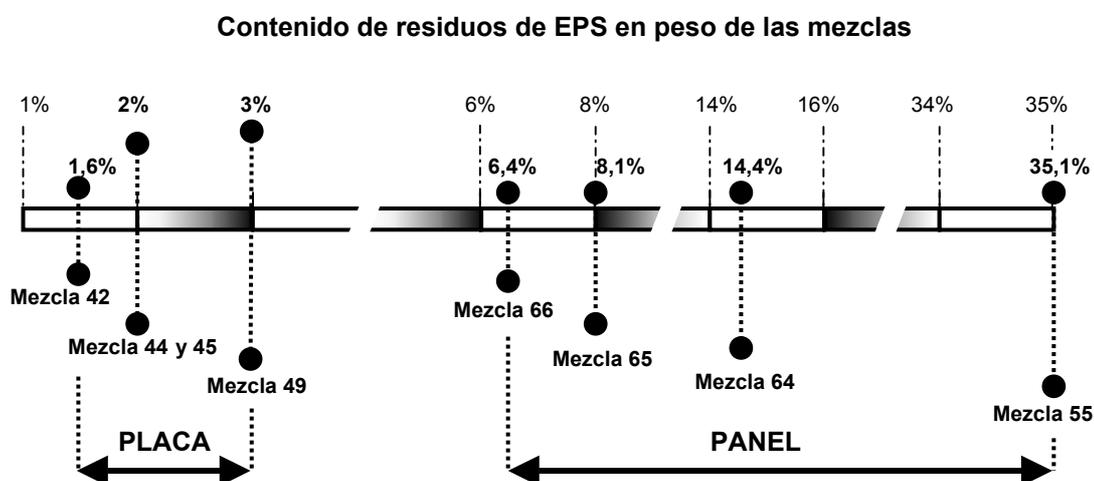


Figura 5.2 Porcentaje de residuos de EPS en peso que contienen las mezclas seleccionadas de **placa** (42, 44, 45, 49) y de **panel** (55, 64, 65, 66) para ensayos

Galería de fotos

5



Foto 5.1



Foto 5.2

Foto 5.1 Probeta número 10 elaborada con baja cantidad de agua al 60% y residuos al 0,09%

Foto 5.2 Probeta 19 elaborada con residuos en tiras de EPS y agua al 80%



Foto 5.3

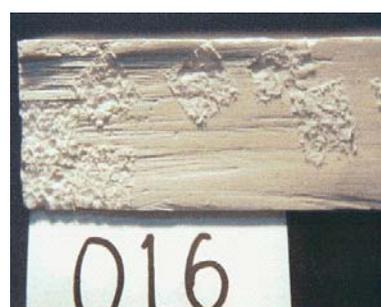


Foto 5.4

Foto 5.3 Probeta 13 elaborada con escayola y agua al 80%, con residuos molido grueso al 0,18%

Foto 5.4 Probeta número 16. Ejemplo de flotación de residuos cortados en cubos

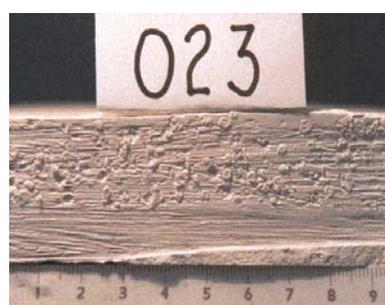


Foto 5.5

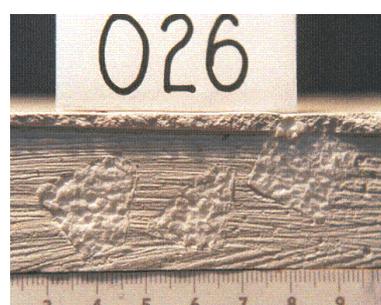


Foto 5.6

Foto 5.5 Probeta 23 elaborada con escayola al 80% de agua y residuos al 0,79% (bicapa)

Foto 5.6 Probeta 26 ejemplo de amasado para lograr impregnar a los residuos de EPS



Foto 5.7

Foto 5.7 Ejemplo de textura de una probeta con alto contenido de EPS y rica agua

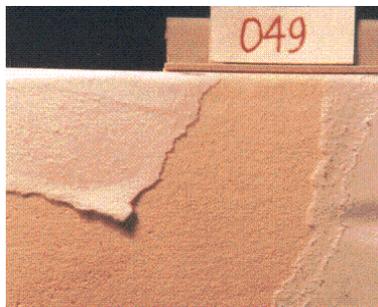


Foto 5.8

Foto 5.8 Probeta 49. Ejemplo de adhesividad aceptable del papel con el núcleo de la probeta



Foto 5.9

Foto 5.9 Probeta 60 elaborada con la preforma número 58

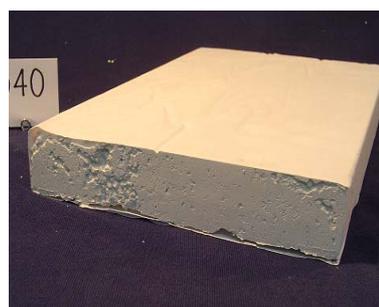


Foto 5.10

Foto 5.10 Probeta 40, fórmula YC100+A100+MG 1.8, primera etapa de selección



Foto 5.11

Foto 5.11 Probeta 41 con fórmula PB+ (YC100+A 120+MG 2), primera etapa de selección



Foto 5.12

Foto 5.12 Probeta 42 con fórmula PC+(YC100+A 120+MG 2), segunda etapa de selección

Galería de fotos

5



Foto 5.13

Foto 5.13 Probeta 43 elaborada en dos capas, primera etapa de selección



Foto 5.14

Foto 5.14 Probeta 44 con fórmula $PC+(YC100+A 120+MG 3)$, segunda etapa de selección



Foto 5.15

Foto 5.15 Probeta 45 con fórmula $PC+(E100+A 120+MG 3)$, segunda etapa de selección



Foto 5.16

Foto 5.16 Probeta 49 con fórmula $PC+(YR100+A 80+MG 1,6)+PB+AN$, segunda etapa de selección



Foto 5.17

Foto 5.17 Probeta 54 con fórmula $(E100+A 500+MG 32,4)+PB+AN$, primera etapa de selección



Foto 5.18

Foto 5.18 Probeta 55 con fórmula $(E100+A 500+MG 35,1)+PB+AN$, segunda etapa de selección

Galería de fotos

5

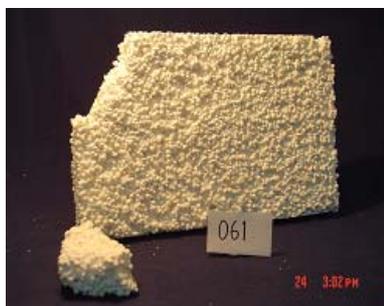


Foto 5.19

Foto 5.19 Probeta 61 con fórmula (E100+A 500+MG 27)+PB, primera etapa de selección



Foto 5.20

Foto 5.20 Probeta 62 con fórmula (E100+A 400+MG 22,5)+PB, primera etapa de selección



Foto 5.21

Foto 5.21 Probeta 63 con fórmula (E100+A 500+MG 27)+PB+AN, primera etapa de selección



Foto 5.22

Foto 5.22 Probeta 64 con fórmula (E100+A 300+MG 14,4)+PB+AN, segunda etapa de selección



Foto 5.23

Foto 5.23 Probeta 65 con fórmula (E100+A 200+MG 8,1)+PB+AN, segunda etapa de selección



Foto 5.24

Foto 5.24 Probeta 66 con fórmula (E100+A 120+MF 6,4)+PB+AN, segunda etapa de selección

6

SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL

ENSAYOS

SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL

6

6 SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL. ENSAYOS

6.1 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LAS MEZCLAS SELECCIONADAS SEGÚN DOS PROPUESTAS DE APLICACIÓN

6.1.1 INTRODUCCIÓN

Con la realización de los trabajos previos a la experimentación y los de manejo y selección de mezclas, se ha confirmado la factibilidad de la obtención de elementos constructivos, usando como materia prima básica materiales compuestos de residuos molidos de EPS conglomerados con yeso o escayola. Al variar las proporciones de los ingredientes anteriores y en las condiciones como aquí se procesan, se obtienen materiales con diferentes propiedades y formas de empleo. En el capítulo 6 se proponen dos aplicaciones para el aprovechamiento de los materiales compuestos:

- Un producto de usos similares a los de la placa de yeso estándar comercial.
- Un producto de usos similares a los de un panel de aislamiento térmico de EPS para la construcción.

Una vez establecidas de forma general las aplicaciones de interés y seleccionadas las mezclas que mejor corresponden a los requerimientos de esas aplicaciones, se hace necesario un examen de las propiedades, ventajas y limitaciones de los materiales compuestos.

Con el fin de determinar un perfil técnico que permita establecer el mejor uso para las mezclas ensayadas, se practica una etapa de investigación de laboratorio, cuyos elementos básicos y resultados se describen a lo largo de este capítulo.

De manera simultánea a las pruebas de los materiales propuestos también se ensayan dos tipos más de probetas:

- a. Materiales comerciales. Son muestras que provienen de materiales de construcción convencionales con usos similares al de los materiales propuestos. Estos materiales se describen a continuación:
 - Placa de yeso laminado de composición estándar (Tipo STD), con un espesor de 12,5 mm. Con alma de yeso y caras revestidas con lámina de cartón. Clasificación al fuego M-1 (No inflamable). Fabricadas según la Norma UNE 102023.
 - Panel de espuma virgen de EPS tipo III con una densidad de 15 kg/m³, de dimensiones 600 x 1200 x 30 mm.
- b. Materiales de referencia (R). Son muestras de fabricación propia con las mismas fórmulas que las mezclas de interés, con la excepción de que no contienen residuos de espuma. La letra R aparece antes del número de la fórmula de las probetas, por ejemplo, R (49).

Ambos materiales cumplen la función de ser elementos de comparación en cada ensayo para los materiales propuestos de placa y panel, por lo tanto no se especificarán marcas concretas. No es la intención en esta tesis validar los valores ofrecidos por los fabricantes de placas de yeso laminado y de paneles de EPS y los resultados obtenidos en los ensayos sólo ofrecerán rangos de referencia.

De acuerdo a un conjunto de propiedades de especial interés para cada aplicación se han elegido los siguientes ensayos:

*Propuesta de aplicación como **placa**:*

- Ensayo de absorción de agua por inmersión total. Apartado 6.2.1
- Ensayo de la densidad laminar. Apartado 6.2.2
- Ensayo de flexión. Apartado 6.2.3
- Ensayo de reacción al fuego. Apartado 6.2.4
- Ensayo de resistencia al impacto. Apartado 6.2.5

*Propuesta de aplicación como **panel**:*

- Ensayo de absorción de agua por inmersión total. Apartado 6.3.1
- Ensayo de la compresión. Apartado 6.3.2
- Ensayo de la conductividad térmica. Apartado 6.3.3
- Ensayo de la densidad aparente. Apartado 6.3.4
- Ensayo de flexión. Apartado 6.3.5
- Ensayo de reacción al fuego. Apartado 6.3.6

La fabricación de las probetas de referencia y la fabricación de los materiales propuestos, así como el acondicionamiento de todas las probetas, se ha realizado en el taller del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la UPC.

Los ensayos se han ejecutado casi totalmente en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona y en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona.

El ensayo de determinación de la conductividad térmica se llevó a cabo en el Laboratori del Foc i Termotecnia, de la empresa Applus en la localidad de Cerdanyola, Barcelona.

De manera general, cada uno de los ensayos practicados se ordenan en subtemas que se repiten en todas sus descripciones, lo que permite sistematizar la información. Los ensayos que se describen en el capítulo contienen los siguientes apartados:

- Descripción
- Resultados del ensayo
- Análisis de resultados

- Conclusiones del ensayo

6.1.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Los ensayos demandaron el uso de tres tipos de probetas. Las probetas de placas de yeso y de paneles de espuma de EPS se obtuvieron de muestras de los mismos productos y simplemente se adaptaron a las necesidades de los ensayos donde participaron. Las probetas de los dos tipos restantes, de residuos de espuma y las probeta de referencia (R) hubieron de ser fabricadas (galería 6, foto 6.9 y 6.10).

Para la mayoría de los ensayos se produjeron muestras de dimensiones suficientes, de las cuales se extrajeron las probetas de tamaño acorde a la norma correspondiente; sin embargo, en algunos casos hubieron de fabricarse probetas de características especiales. A continuación se describen las características de las probetas ensayadas y sus procesos de fabricación.

6.1.2.1 Descripción

Las dimensiones de las probetas para los ensayos por cada tipo de aplicación se resumen en las tablas 6.1.1 y 6.1.2.

Las fórmulas de las mezclas empleadas y las características precisas de las probetas se expresan en la descripción que acompaña a cada ensayo.

Tabla 6.1.1 Aplicación similar a placa. Dimensiones de las probetas ensayadas

Ensayo	<i>l</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>d</i> (mm)
Absorción de agua	100	100	12,5
Densidad laminar	300	400	12,5
Flexión	300	400	12,5
Reacción al fuego	150	100	12,5
Resistencia al impacto	300	200	12,5

l = longitud *b* = ancho *d* = espesor

Tabla 6.1.2 Aplicación similar a panel. Dimensiones de las probetas ensayadas

Ensayo	<i>l</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>d</i> (mm)
Absorción de agua	150	120	30
Compresión	100	100	50
Conductividad térmica	600	600	50
Densidad aparente	300	400	30
Flexión	400	120	30
Reacción al fuego	150	50	30

6.1.2.1.a Equipo

El equipo básico empleado en la fabricación de las probetas es el siguiente:

Balanza de resortes con graduación mínima de 5 g y con capacidad máxima de 3 kg

Cronómetro marca Casio® con medición mínima de 0,01 s

Termómetro marca Protón® con graduación mínima de 0,1 °C y máxima de 25 °C

Herramientas de albañilería como espátulas, llanas y cucharones

Contenedores de plástico de diversos tipos para la medición, amasado y manejo de mezclas y materiales.

Además del equipo básico descrito antes se produjeron diversos utillajes o se usaron herramientas ya disponibles en los laboratorios. Los utillajes metálicos se produjeron en el Taller de Mecánica de la UPC y los utillajes de madera se mecanizaron en el Taller de Modelos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona. A continuación se describen algunas características de los utillajes usados para la fabricación de las probetas:

1. Molde rectangular para la fabricación de probetas para placa. Como se muestra en la figura 6.1.1.

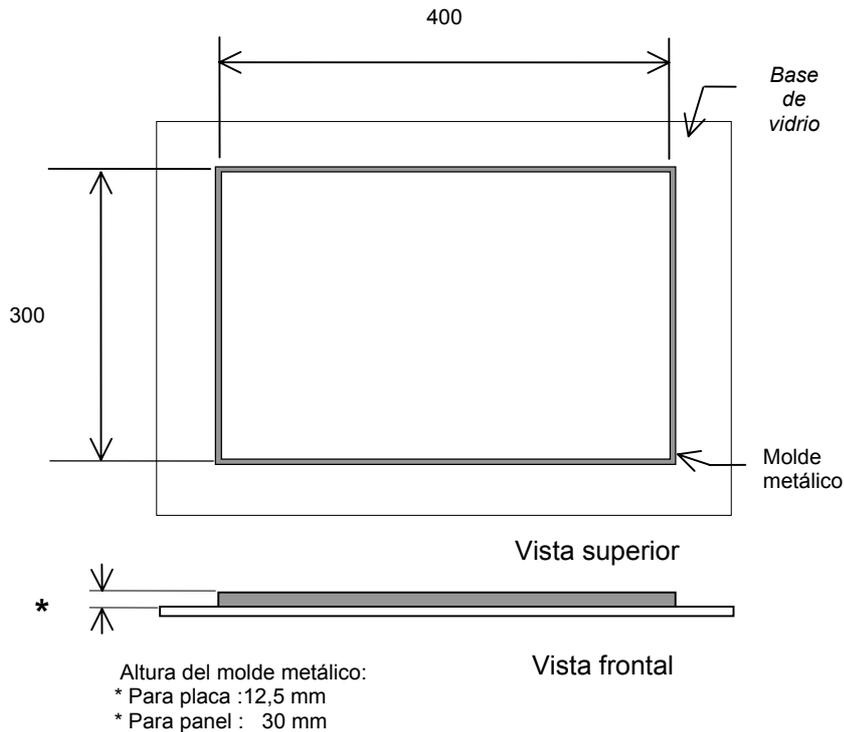


Figura 6.1.1 Conjunto de molde metálico y base de vidrio
 Sin escala Acotación: mm

Características:

Fabricado en solera metálica de 5 mm de espesor

Cavidad de 400 x 300 x 12 mm

Tapa metálica de las mismas dimensiones que la cavidad

Fondo de vidrio de 9 mm de espesor

2. Molde rectangular para la fabricación de probetas para panel. Como se muestra en la figura 6.1.1.

Características:

Fabricado en solera metálica de 5 mm de espesor

Cavidad de 400 x 300 x 30 mm

Tapa metálica de las mismas dimensiones

Fondo de vidrio de 9 mm

3. Molde desarmable de tres cavidades para la fabricación de paralelepípedos

Características:

Molde desarmable metálico, provisto de sistemas de sujeción mecánicos

Tres cavidades de 40 x 40 x 160 mm cada una

Fondo metálico con espesor de 10 mm (foto 6.1)

4. Molde para la fabricación de probetas para el ensayo de conductividad térmica. Como se muestra en la figura 6.1.2.

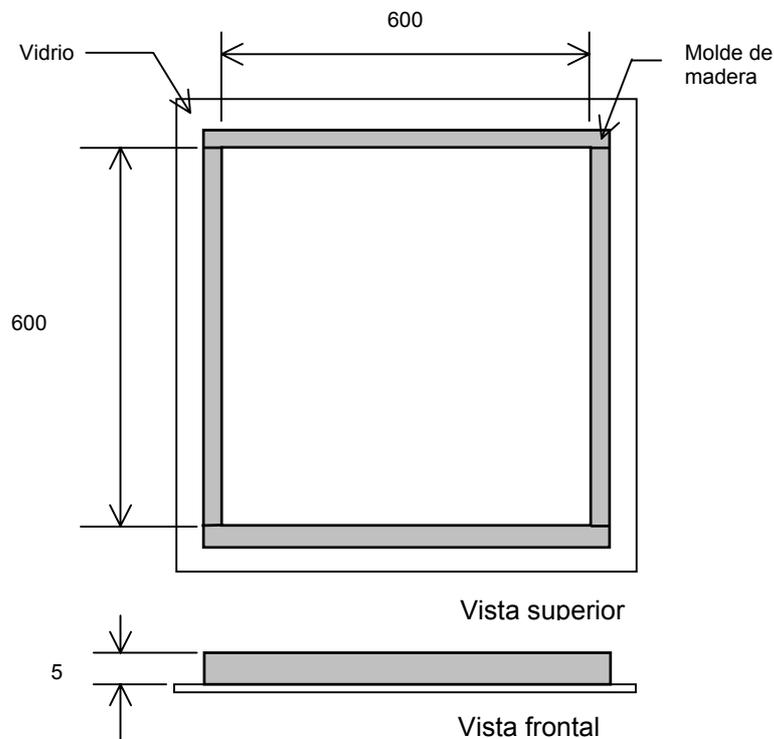


Figura 6.1.2 Conjunto de molde de madera y base de vidrio
Sin escala Acotación: mm

Características:

Molde desarmable de madera y provisto de sistemas de sujeción mecánicos

Cavidad de 600 x 600 x 50 mm

Tapa de madera contrachapada plana de las mismas dimensiones

Fondo de vidrio de 9 mm de espesor



Foto 6.1



Foto 6.2

Foto 6.1 Molde metálico desarmable para la fabricación de paralelepípedos

Foto 6.2 Molde de probetas para el ensayo de compresión de panel

5. Molde para la fabricación de probetas para el ensayo de compresión

Características:

Molde desarmable de madera y provisto de sistemas de sujeción mecánicos

Cavidad de 100 x 100 x 50 mm

Tapa de madera contrachapada plana de las mismas dimensiones

Fondo de vidrio de 9 mm de espesor (foto 6.2)

6. Banco de pruebas de fabricación especial (ver ensayo de flexión, figura 6.2.1)

Características:

Banco metálico fabricado en acero provisto de apoyos fijos y móviles

Dimensiones de 380 x 300 x 50 mm

7. Soporte metálico para el ensayo de reacción al fuego

Características:

Soporte fijo vertical con altura de 600 mm, fabricado en acero dotado con trípode

Largo del brazo movable hasta 400mm

Prensa para la sujeción de probetas

6.1.2.1.b Materiales

Los materiales para la fabricación de las probetas fueron los siguientes:

1. Residuos molidos de espuma de EPS

- Molido grueso (MG)
- Molido fino (MF)

Las características de los residuos molidos se describen en el punto 4.1.3.3.a.

2. Yeso y escayola

- Yeso rápido (YR)
- Yeso controlado (YC)
- Escayola (E)

Las características de estos conglomerantes se describen en el punto 5.1.1.4.a.

3. Cartón y papel

- Cartón gris de reciclado de 0,45 mm de espesor
- Papel bond blanco de 0,080 kg/m²

6.1.2.1.c Procedimiento

Las probetas se fabricaron a temperatura de laboratorio (23 ± 3) °C y todas se secaron al venteo.

Para la fabricación se ha atendido el procedimiento general descrito en el punto 5.1.1.4.f.

Las medidas de las probetas para cada propuesta de aplicación, corresponden a las tablas 6.1.1 y 6.1.2 de este capítulo.

6.1.3 METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS

Para establecer un perfil acerca de las propiedades y las características de los materiales propuestos, se han realizado ensayos con fórmulas específicas, que han sido seleccionadas en las etapas anteriores de la investigación (capítulo 5, apartado 5.2.2).

Se han seleccionado dos grupos de ensayos (apartado 6.1.1), que corresponden a las dos aplicaciones propuestas para las mezclas de residuos de espuma y conglomerantes.

En esta parte del trabajo los ensayos se han practicado atendiendo lo marcado en Normas UNE, UNE-EN, y de la ASTM. De entre esos grupos de Normas se ha seleccionado entre ellas una o varias para cada prueba específica.

Los probetas se han ensayado bajo las mismas condiciones de laboratorio, de manera que resulte válida la comparación entre los materiales propuestos con los materiales de referencia y con los materiales de construcción convencionales. Además se han considerado los valores señalados por la literatura técnica obtenida en la investigación preliminar.

Después de la aplicación de la prueba y de la organización de los datos, se ha efectuado un análisis de resultados con un grupo de conclusiones por ensayo.

Finalmente, en base a toda la información obtenida, se establece un grupo de conclusiones generales organizadas por cada aplicación propuesta, de las cuales también se desprende una selección acerca de las mezclas con mejor desempeño para cada aplicación.

6.1.3.1 Interpretación de fórmulas condensadas del capítulo 6

La manera de nombrar las mezclas ensayadas corresponde a lo siguiente:

1. Las mezclas tienen una clave numérica única válida para toda la tesis (por ejemplo Mezcla 49)
2. Cada mezcla tiene una fórmula única, generalmente escrita de manera condensada formada por tres elementos que corresponden a sus componentes separados por un signo (+); un ejemplo en la tabla 6.1.3.

Tabla 6.1.3 Ejemplo de uso de la nomenclatura usada en el capítulo 6

Número de mezcla	Fórmula extendida y fórmula condensada	Explicación de la fórmula
49	Yeso rápido 100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6% o YR100+A 80 + MG 1,6	Yeso rápido 100% en peso con 80% en peso de agua de amasado, mezclado con 1,6% en peso de residuo molido grueso de EPS

3. El primer y segundo elemento de la expresión corresponde al tipo de conglomerante en polvo usado en la mezcla (por ejemplo, YR 100 = yeso rápido al 100% en peso) y la proporción de agua de amasado usada en la mezcla (80 % en peso de agua de amasado con relación al peso del conglomerante seco).
4. El tercer elemento de la expresión está compuesto por el tipo de residuo usado (por ejemplo “MG”), y un porcentaje de correspondencia (1,6% en peso del yeso seco). El porcentaje permite calcular la cantidad de espuma de EPS en gramos presente en la mezcla.
5. Todos los porcentajes son en peso, con relación al peso seco del conglomerante.
6. La cantidad de espuma que corresponde a una mezcla, resulta de multiplicar el peso del conglomerante seco usado en gramos por el porcentaje asignado en la fórmula.

Así, la expresión “MG 1,6”

Significa:

Residuo molido grueso de EPS aplicado en la mezcla en un porcentaje del 1,6% del peso seco del yeso.

Entonces la fórmula YR100+A 80+MG 1,6 de la mezcla 49 se lee:

- *Yeso Rápido 100% en peso (g) amasado con el 80% de agua en peso (g), más residuo molido grueso de EPS (g) al 1,6% del peso seco del yeso.*

Durante todos los ensayos aparecen fórmulas a las cuales les antecede una letra **R**. Esta letra indica que se trata de una *probeta de referencia* y que corresponde a una mezcla con la misma formulación que aquellas probetas de fabricación propia, salvo que **no** contienen residuos de espuma de EPS. Un ejemplo de este caso se muestra en la tabla 6.1.4.

Tabla 6.1.4 Ejemplo de la nomenclatura usada para las probetas de referencia (R)

Número de mezcla	Fórmula (% en peso)
R (45)	Escayola 100% + agua 120% ó E 100 + A 120

Donde la expresión R (45) significa:

“Probeta de referencia (R) número 45, formulada únicamente de escayola (E) al 100% en peso con un porcentaje del 120% en peso de agua de amasado.”

En la mayoría de los ensayos se aplica la prueba a una *serie de probetas* que corresponden a una misma fórmula de mezcla y que aparecen indicados con un número seguido de un guión, después de la clave de la probeta.

Tabla 6.1.5 Ejemplo de aplicación de nomenclatura para cada una de las probetas pertenecientes a una misma serie

Número de probeta	Fórmula
49-1	YR 100 + A 80 + MG 1,6
49-2	YR 100 + A 80 + MG 1,6

Donde:

- La expresión 49-1 corresponde a la probeta ensayada número 1 de la mezcla número 49.
- La expresión 49-2 corresponde a la probeta ensayada número 2 de la mezcla número 49.

Así por ejemplo, tenemos que todas las probetas 49 que comparten el mismo número inicial, corresponden a la misma serie y tendrán la misma fórmula de mezcla (YR100 + A 80+ MG 1,6).

Las abreviaturas usadas en las fórmulas de las probetas usadas durante los ensayos son los siguientes:

Tabla 6.1.6 Abreviaturas de componentes y residuos de EPS usados en el capítulo 6

Componentes	Abreviatura
Yeso rápido o acelerado	YR
Yeso controlado o lento	YC
Escayola	E
Agua	A
Residuo Molido Grueso de EPS	MG
Residuo Molido Fino de EPS	MF

6.2 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS PARA LA PROPUESTA DE APLICACIÓN COMO PLACA DE YESO

6.2.1 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA POR INMERSIÓN TOTAL DE PLACAS

6.2.1.1 Descripción

La estructura porosa del yeso, su tendencia a absorber humedad y el impacto que tiene todo ello en las propiedades mecánicas de los productos fabricados con ese conglomerante, han evidenciado en nuestro proyecto la necesidad de practicar ensayos de absorción de agua.

Este ensayo tiene por objeto la determinación de la masa de agua absorbida por las probetas sumergidas en condiciones y plazos controlados.

6.2.1.1.a Norma utilizada UNE 102035/1M:2001

El ensayo se ha adaptado en lo señalado en la Norma UNE 102035/1M:2001 *Placa de yeso laminado. Métodos de ensayo. Apartado 12. Capacidad de absorción de agua. Determinación de absorción total de agua.*

Se ha empleado esta norma debido a la similitud que guardan las placas de yeso existentes en la industria de la construcción y los materiales que aquí se ensayan.

6.2.1.1.b Equipo

Para la realización de los ensayos se contó con el siguiente equipo e instrumental:

Desecador

Balanza electrónica de precisión con una exactitud de $\pm 0,1$ g marca Sartorius®

Termómetro Protón® con una capacidad de medición máxima de 27 °C y con mediciones mínima de 0,10 °C

Vernier o pie de rey Mitutoyo® con una precisión de 0,1 mm

Flexómetro con una medición mínima de 1,0 mm

Tinas de Inmersión con una capacidad de 12 l de agua

Contrapesos de aluminio

6.2.1.1.c Preparación de las probetas

El tamaño de las probetas a ensayar según la Norma UNE 102023:1998 son 300 mm ($\pm 1,5$) x 300 mm ($\pm 1,5$). El tamaño de las probetas se ha modificado. La fabricación de las probetas se ha realizado en el taller del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la UPC.

Se ensayaron al menos tres probetas de cada tipo y con las dimensiones siguientes:

Longitud 150 (± 1) mm
 Ancho 100 (± 1) mm
 Espesor 13 (± 1) mm

Estas probetas se obtuvieron cortándolas cuidadosamente de otras muestras de mayores dimensiones.

El ensayo de absorción total de agua se aplicó con el mismo procedimiento y de manera simultánea tanto a probetas estándar de fabricación comercial como a probetas de referencia (R) y a probetas fabricadas con yeso o escayola con residuos molidos de EPS; las dimensiones de los tres tipos de probetas fueron las mismas, con la intención de producir información que permita comparar todas las conductas. En la tabla 6.2.1 se describen las claves y formulaciones de las probetas que se ensayaron.

Tabla 6.2.1 Características de las probetas a ensayar a absorción de agua por inmersión total

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
Placa estándar comercial	Indeterminada	-
42	Yeso controlado 100%+agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC100+A 120+MG 2
44	Yeso controlado 100%+agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	YC100+A 120+MG 3
45	Escayola 100%+agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E100+A 120+MG 3
49	Yeso rápido 100%+agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR100+A 80+MG 1,6
R (42-44)	Yeso controlado 100% + agua 120%	YC100+A 120
R (45)	Escayola 100% + agua 120%	E100+A 120
R (49)	Yeso rápido 100% + agua 80%	YR100+A 80

Se buscó en todo momento que el manejo de las probetas fuese siempre dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la norma en cuestión. El ensayo se ejecutó en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona de la UPC.

6.2.1.1.d Procedimiento

El procedimiento de la prueba fue el siguiente:

1. Acondicionar las probetas a masa constante a (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % HR.
2. Inspeccionar las probetas.
3. Pesar las probetas con exactitud de 0,1 g.
4. Sumergir las probetas en agua a (23 ± 2) °C durante (120 ± 2) minutos en posición vertical.
5. Sacar las probetas del agua y dejar escurrir el exceso de agua durante 10 ($-1,+2$) minutos sobre una superficie absorbente.
6. Pesar tres veces consecutivas cada probeta ensayada con una exactitud de 0,1 g inmediatamente después de escurrir el exceso de agua.

7. Pesarse nuevamente cada probeta ensayada tres veces consecutivas con una exactitud de 0,1 g, a las 24, 48 y 72 horas, y a los 10, 17 y 24 días posteriores a la aplicación de la prueba.

Se registraron los pesos que presenta cada muestra para los seis períodos con relación al peso inicial o peso seco.

Se calcularon las relaciones para cada probeta en porcentaje entre la masa seca y la medida de la masa correspondiente al período de que se trate. Para ello se usó la siguiente expresión:

$$\Delta = (m_x - m_0 / m_0) \times 100$$

Donde:

Δ Es el incremento porcentual de la masa de la probeta para el período

m_0 Es la masa seca en g

m_x Es la masa húmeda en g para el período correspondiente

Finalmente se calculó la media aritmética de los porcentajes individuales obtenidos por mezcla y período.

6.2.1.2 Resultados del ensayo de absorción de agua

Después de la inmersión en agua, las probetas se han pesado tres veces consecutivas en cada período. En la tabla 6.2.2 se exponen sólo los promedios que resultan de las tres pesadas en g y el período (m_0 a m_6) en que se realizaron.

Tabla 6.2.2 Promedios de los pesos obtenidos por probeta en cada período

No. Probeta	Fórmula	m_0 seco (g)	m_1 15 min (g)	m_2 24 hrs (g)	m_3 48 hrs (g)	m_4 10 días (g)	m_5 17 días (g)	m_6 24 días (g)
Comercial 1*	indeterminada	134,3	211,9	180,08	176,1	164,4	134,3	134,3
Comercial 2*	indeterminada	137	209,7	182,8	179,4	145,4	137,2	137
Comercial 3*	indeterminada	139,4	220,9	201,8	195,8	187,1	139,3	139,4
Comercial 4*	indeterminada	144,3	215,5	196,1	186,4	164,4	144,8	144,3
Comercial 5*	indeterminada	137,9	213	187,9	184,5	156,8	138	137,9
Comercial 6*	indeterminada	134,4	213	195,8	190,1	180	134,4	134,4
Comercial 7*	indeterminada	142,9	214,6	184,4	181,4	161,9	143,1	142,9
Comercial 8*	indeterminada	136,5	213	184	163,9	141,5	136,6	136,5
R (42-44) - 1	YC100+A 120	152,97	253,1	220,4	205,7	177,7	151,2	150,9
R (42-44) - 2	YC100+A 120	151,3	256,5	223,9	204,3	194,6	151,7	151,3
R (45) - 1	E100+A 120	144,6	250	218,8	205,1	188,1	141,6	141,4
R (45) - 2	E100+A 120	149,6	261,9	231,2	223,7	214,7	149,1	148,7
R (49) - 1	YR100+A 80	197	286,9	273,1	258,2	241,2	196,1	195,8
R (49) - 2	YR100+A 80	202,03	290,5	273,8	257	231,1	201,2	200,9
* Placa de yeso laminado estándar, 12,5 mm de espesor, revestida con láminas de cartón								Continúa

Continúa tabla 6.2.2

No. Probeta	Fórmula	m_0 seco (g)	m_1 15 min (g)	m_2 24 hrs (g)	m_3 48 hrs (g)	m_4 10 días (g)	m_5 17 días (g)	m_6 24 días (g)
42-1	YC100+A120+MG 2	96,95	169,7	136,1	120,7	105	95,8	95,7
42-2	YC100+A 120+MG 2	94,95	159,9	125,4	110,1	103,2	90,1	90
42-3	YC100+A120+MG 2	95,73	179	137,4	131,3	114,3	94,6	94,2
42-4	YC100+A 120+MG 2	101,73	171,5	145,7	140,1	129,3	100,2	100,2
45-1	E100+A 120+MG 3	87,78	160	123,1	117,2	101,8	85,4	85,1
45-2	E100+A 120+MG 3	82,78	148,5	110,1	102,9	86,7	79,6	79,6
45-3	E100+A 120+MG 3	88,65	166,5	135,8	128,1	118,2	88,7	88,6
45-4	E100+A 120+MG 3	78,65	150,5	119,5	104,4	97,9	77,8	77,7
44-1	YC100+A 120+MG 3	82	156,7	134,5	109,8	86,3	82,6	82,3
44-2	YC100+A 120+MG 3	86	158,7	133,2	124,6	113,7	84,9	84,9
44-3	YC100+A 120+MG 3	92,2	166,5	147,7	130	123,9	91,1	91
44-4	YC100+A 120+MG 3	83,2	149,4	120,7	97,9	91,1	78,6	78,5
49-1	YR100+A 80+MG 1,6	111,18	178,1	151,8	148,8	141,6	111,3	111,3
49-2	YR100+A 80+MG 1,6	111,12	175,9	152,6	142,1	133,4	109,4	109,4
49-3	YR100+A 80+MG 1,6	120,07	189	161,1	138,1	130	119,2	119
49-4	YR100+A 80+MG 1,6	122,07	181	155,4	130,8	125,2	112,1	111,9

Con base a los datos que se recabados la tabla 6.2.2 se obtuvieron las medias aritméticas de los pesos de probetas de la misma fórmula. Posteriormente se calcularon los porcentajes que relacionan al peso seco de las probetas con el peso húmedo de las mismas para cada período; los resultados por serie se exponen en la tabla 6.2.3.

Tabla 6.2.3 Aumento de peso promedio por cada serie en relación al peso inicial o peso seco

Serie	Fórmula	Δx_1 15 min (%)	Δx_2 24 hrs (%)	Δx_3 48 hrs (%)	Δx_4 10 días (%)	Δx_5 17 días (%)
Comercial	indeterminada	54,7	36,7	31,7	17,7	0,1
R (42-44)	YC100+A 120	67,5	46,0	34,8	22,4	-0,4
R (45)	E100+A 120	74,0	52,9	45,7	36,8	-1,2
R (49)	YR100+A 80	44,7	37,1	29,1	18,4	-0,4
42	YC100+A120 + MG 2	74,8	39,8	28,8	15,9	-2,2
45	E100+A 120 + MG 3	85,2	44,6	33,8	19,6	-1,9
44	YC100+A 120 + MG 3	83,9	56,0	34,4	20,3	0,0
49	YR100+A 80 + MG 1,6	56,1	33,9	21,0	14,6	-2,6

Δx = Incremento en por ciento con relación al peso seco

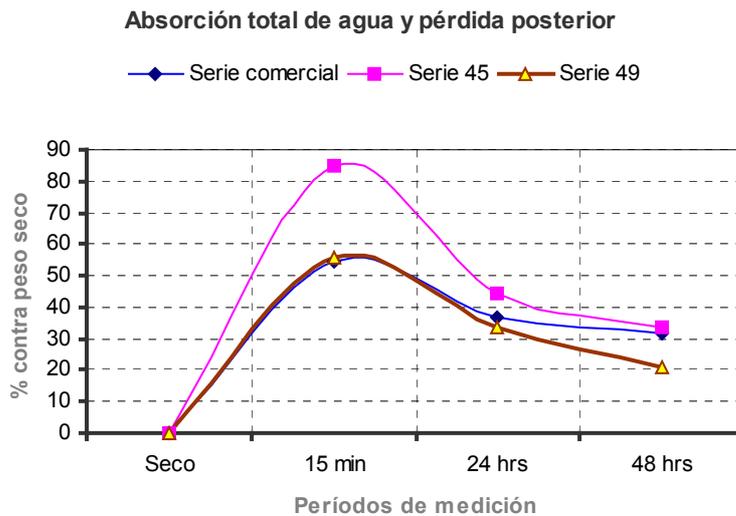
6.2.1.3 Análisis de resultados del ensayo de absorción de agua

Se puede entender de los datos obtenidos, que en lo general fue mayor la absorción total de agua en mezclas con la presencia de residuos de espuma. Algunas posibles razones para esta diferencia son:

El tipo de cartón aplicado en las probetas con espuma de EPS es un cartón gris de celulosa reciclada, el cual muestra gran avidez por agua debido a su propia alta porosidad. El cartón usado en las placas de yeso estándar es especial para esta aplicación y entre sus características figura la de una menor absorción de agua. Inclusive se ofrecen en el mercado placas de yeso especialmente formuladas para disminuir su absorción total de agua hasta valores menores al 5% de peso seco.

Las series que contienen residuos son materiales heterogéneos con cuerpos huecos dentro de ellos; esto a simple vista parece favorecer la formación de más zonas porosas que en probetas sin agregados.

De acuerdo con la tabla 6.2.3 la mayor absorción de agua en peso con relación peso seco se registra durante el primer pesaje (Δx_1); esto es cuando las probetas han dejado de gotear. En ese período la mayor absorción se da en la serie 45 con 85,2% que contiene residuos de espuma de EPS, y la menor absorción en las probetas R (49) con 44,7%; esta última serie se fabricó únicamente con yeso y agua de amasado (gráfica 6.2.1).



Gráfica 6.2.1 Absorción total de agua máxima y mínima del ensayo

Se puede observar la diferencia que se presenta entre la serie R (42/44) y la serie R (49). Ambas están preparadas sólo con yeso y agua de amasado, sin embargo hay 22,8 puntos porcentuales de incremento de peso entre ambas y que se puede explicar principalmente por la diferente proporción de agua de amasado usada en su fabricación y que migra al medio durante el fraguado y el endurecimiento, lo que deja poros en el cuerpo fabricado y que tienden a ser ocupados por agua durante la inmersión.

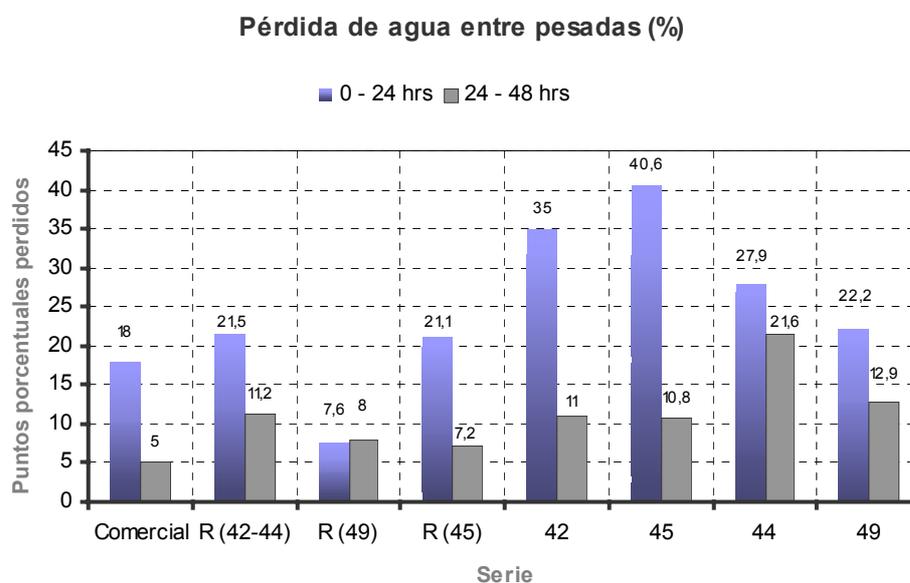
Por lo que respecta a las mezclas que contienen residuos de espuma, los porcentajes de absorción de agua tienden a ser más elevados que en las probetas sin agregados. La mezcla de mayor absorción (45) reporta casi 30 puntos porcentuales sobre la de menor absorción (49). Esto puede darse debido a que la última tiene una menor participación de agua de amasado (80%) y menor porcentaje de residuos en peso (MG 1,6%) que la primera (MG 3%).

Dos mezclas con residuos de gran similitud de fórmula (45) y (44) donde la única variación es que una esta fabricada con escayola y la otra con yeso controlado, la absorción máxima es muy similar 85,2% y 83,9%; sin embargo, la pérdida de peso más rápida se da en la mezcla fabricada con escayola, lo que puede señalar la presencia de poros más grandes o más interconectados.

La pérdida de peso de las probetas después de la inmersión se puede traducir en pérdida de agua. En la tabla 6.2.3 se observa que la mayor pérdida se da durante las 24 horas siguientes a la aplicación de la prueba para después disminuir y estabilizarse, hasta finalmente regresar a pesos muy similares a los registrados al inicio del ensayo.

La mayores pérdidas de peso en unidades porcentuales a las 24 horas, se dieron en las mezclas con contenido de residuos de espuma con una pérdida máxima de 41 puntos para la serie 45 y el menor de 22 puntos para la serie 49 (gráfica 6.2.1).

En las mezclas sin residuos las pérdidas a 24 horas son más homogéneas. Entre las series donde la mayor pérdida se da en dos series con resultados muy similares son la serie R (42-44), que ha perdido 21,5 puntos y la serie R (45) con 21,1 puntos. La menor pérdida en estos materiales para el período son 7,6 puntos de la mezcla R (49). Gráfica 6.2.2.



Gráfica 6.2.2 Pérdida de agua en puntos porcentuales entre pesos

6.2.1.4 Conclusiones del ensayo de absorción de agua

- Todos los materiales ensayados absorben altas proporciones de agua en peso, con aumentos promedios que oscilan entre los 44,7% en la serie R (49) y el 85,2% en la serie 45.
- Las características de la unión entre los núcleos y las cubiertas de cartón usados en el ensayo, resultaron de gran importancia en los diferentes porcentajes de absorción de agua reportados en las muestras.
- Las mezclas que se han ensayado y que contienen residuos de espuma de EPS, absorben proporciones más altas de agua que las mezclas que no contienen residuos

(probetas de referencia); en algunos casos la diferencia fue mínima (mezcla 49) y en otros fue mucho más notoria (mezcla 45). Tabla 6.2.3.

- Las mezclas que se han ensayado y que contienen residuos de espumas de EPS pierden el agua absorbida durante la inmersión con mayor velocidad que las mezclas sin residuos.
- Los dos últimos efectos se pueden explicar por una mayor porosidad en las mezclas con residuos de espuma, producto de una relación mayor de agua de amasado, aunque también las perlas de EPS por sí mismas parecen aportar a una mayor absorción de agua en las mezclas que participan.
- En las mezclas sin residuos, mientras mayor es la proporción de agua de amasado también es mayor su aumento de masa por absorción de agua. Esto puede indicar una mayor presencia de porosidad; la idea se refuerza con los datos que señalan que las mezclas sin residuos de espuma y con menos cantidad de agua de amasado pierden el agua absorbida más lentamente.
- Mientras que en las placas comerciales ensayadas la pérdida de agua absorbida se da de manera constante, en los materiales con la presencia de residuos, la pérdida de agua es notoriamente mayor en las primeras 24 horas después de la inmersión, para después suavizarse esa pérdida.
- De entre todas las mezclas con presencia de residuos, la mezcla 49 muestra una conducta a la absorción y pérdida de agua muy similar a la de la placa comercial.
- En las muestras ensayadas y que contienen residuos de espuma, se puede observar una pequeña pérdida de masa al final de la prueba con relación a su masa seca al inicio del ensayo. La pérdida se puede atribuir como una disolución del conglomerante en el agua de inmersión.
- La pérdida de masa en las muestras de placa comercial es insignificante o no se da. Esto se puede explicar por una menor circulación de agua absorbida dentro de la muestra o por la menor porosidad del núcleo comparadas contra las muestras artesanales. En la diferencia de pérdida de agua entre las muestras comerciales y las probetas artesanales, también participa una mejor unión entre el núcleo de la muestra con la cubierta de cartón, en el caso de las muestras de placas comerciales.

6.2.2 ENSAYO DE LA DENSIDAD LAMINAR DE PLACAS

6.2.2.1 Descripción

El método consiste en la determinación de la masa por unidad de superficie de cada probeta; esto con el fin de establecer una comparación entre las masas de los tipos de materiales en estudio y las de algunas de las placas de yeso disponibles hoy en el mercado. La densidad laminar es la cantidad total de la masa de una placa en función a su espesor, expresado en kg/m^2 . También se define por la Norma UNE 102035 como Masa por unidad de superficie.

6.2.2.1.a Norma utilizada UNE 102035/1M:2001

El ensayo se ha basado en la Norma Española UNE 102035/1M:2001 *Placas de yeso laminado. Métodos de ensayo. Apartado 8. Determinación de la masa por unidad de superficie.*

Se ha utilizado esta norma debido a la similitud que se da entre las placas de yeso usadas en la construcción y los materiales que se proponen.

6.2.2.1.b Equipo

Se ha utilizado el siguiente instrumental de precisión según lo indica la norma:

Balanza de precisión marca Sartorius® con lecturas de aproximación a 0,1 g

Flexómetro con una graduación mínima de 0,5 mm

Horno de secado marca Selecta®, temperatura máxima de 90 a 100 °C (± 5 °C)

6.2.2.1.c Preparación de las probetas

Las probetas corresponden a las mezclas seleccionadas en la primera etapa experimental. Tabla 6.2.4:

Tabla 6.2.4 Características de las probetas del ensayo de la densidad laminar

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
R (42-44)	Yeso controlado 100% + agua 120%	YC100 + A 120
R (45)	Escayola 100% + agua 120%	E100 + A 120
R (49)	Yeso rápido 100% + agua 80%	YR100 + A 80
42	Yeso controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC100 + A 120+MG 2
44	Yeso controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	YC100 + A 120+MG 3
45	Escayola 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E100 + A 120 + MG 3
49	Yeso rápido 100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR100 + A 80 + MG 1,6

En cada probeta se buscó que cumpliera con las dimensiones que demanda la norma para el ensayo 12,5 x 300 ($\pm 1,5$) x 400 ($\pm 1,5$) mm. Sin embargo por el carácter artesanal de su fabricación no fue siempre posible lograr tal precisión. Cuando esto sucedió se asentó en las notas de experimentación y se consideró en los análisis correspondientes.

Las probetas de placa de yeso se produjeron a similitud de las placas de yeso comerciales con espesores equivalentes (12,5 mm). Los recubrimientos de las probetas se hicieron con cartón de material reciclado (gris) monocapa tanto en su cara como en su dorso, ambos lienzos con espesor de 0,45 mm cada uno. En las placas de yeso laminado presentes en el mercado, los recubrimientos de celulosa son papeles multicapas de espesores parecidos y de fabricación especial para ese uso.

Durante la experimentación también se han realizado las mediciones y cálculos descritos en probetas que llamamos *de referencia* (R), las cuales han sido preparados con los mismos materiales y procesos de fabricación que las mezclas anteriores, con la única diferencia que éstas no tienen residuos de espuma integrados. Las probetas con prefijo (R) permiten la comparación entre productos con y sin residuos de EPS.

Para el ensayo de las probetas se han observado y atendido los aspectos de acondicionamiento previo señaladas en la misma norma, al mantenerlas en un recinto con temperatura de (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % de humedad relativa hasta que se ha comprobado la

masa constante de las probetas (± 10 g). El ensayo se ha realizado en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UPC.

6.2.2.1.d Procedimiento

Una vez comprobada la masa constante de cada probeta. Se han ejecutado los siguientes pasos:

1. Pesarse cada placa al menos cuatro veces consecutivas.
2. Medir los dos largos (l) y los dos anchos (b) de cada placa.
3. Calcular la masa por unidad de superficie de cada probeta. La norma usada señala como procedimiento de cálculo la expresión:

$$M = mx / A$$

Donde:

M Es la masa por unidad de superficie de una placa de yeso o escayola en kg/m^2

mx Es la media aritmética de las pesadas (m) sobre las probetas en kg

A Es la superficie de las placas ensayadas en m^2

En el procedimiento de cálculo señalado en la norma, la masa se ha de dividir entre una superficie fija de $0,4 \times 0,3 \text{ m}^2$ ($0,12 \text{ m}^2$). En nuestro experimento, se ha calculado el área individual de cada probeta multiplicando las medias aritméticas de su largo (lx) y su ancho (bx) en mm^2 .

El resultado final del cálculo, se da al obtener la media aritmética de la masa por unidad de superficie (M) de las probetas pertenecientes a cada mezcla en kg/m^2 .

6.2.2.2 Resultados del ensayo de la densidad laminar

Los resultados individuales de las mediciones de las masas y de las dimensiones de las probetas se organizan en las tablas siguientes:

Tabla 6.2.5 Medición de masas de las probetas y sus promedios

Probeta	m_1 (kg)	m_2 (kg)	m_3 (kg)	m_4 (kg)	mx (kg)
R (42-44) 1	1,247	1,248	1,248	1,248	1,2477
R (42-44) 2	1,242	1,242	1,242	1,242	1,242
R (45) 1	1,375	1,374	1,375	1,3747	1,3747
R (45) 2	1,369	1,369	1,368	1,369	1,3687
R (49) 1	1,651	1,652	1,652	1,652	1,6517
R (49) 2	1,643	1,642	1,643	1,643	1,6423
42-1	0,769	0,769	0,769	0,770	0,7693
42-2	0,684	0,684	0,685	0,684	0,6843
42-3	0,778	0,778	0,779	0,778	0,7783
44-1	0,699	0,698	0,698	0,699	0,6985
					<i>Continúa</i>

Continúa tabla 6.2.5

Probeta	m_1 (kg)	m_2 (kg)	m_3 (kg)	m_4 (kg)	m_x (kg)
44-2	0,641	0,641	0,640	0,641	0,6408
44-3	0,637	0,637	0,629	0,629	0,6330
44-4	0,662	0,662	0,661	0,662	0,6618
44-5	0,667	0,666	0,667	0,666	0,6665
44-6	0,686	0,686	0,686	0,685	0,6858
45-1	0,649	0,649	0,648	0,609	0,6388
45-2	0,632	0,632	0,632	0,633	0,6323
45-3	0,648	0,649	0,648	0,649	0,6485
45-4	0,667	0,667	0,668	0,667	0,6673
45-5	0,661	0,661	0,662	0,662	0,6615
45-6	0,687	0,687	0,687	0,688	0,6873
45-7	0,710	0,710	0,711	0,711	0,7105
49-1	0,882	0,882	0,881	0,881	0,8815
49-2	0,937	0,938	0,937	0,938	0,9375
49-3	0,942	0,942	0,942	0,943	0,9423

m = masa

Tabla 6.2.6 Medición de largos y anchos de las probetas y sus promedios

Probeta	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_x (mm)	b_1 (mm)	b_2 (mm)	b_x (mm)
R (42-44) 1	399	399,5	399,3	299,5	300	299,8
R (42-44) 2	398,5	399,5	399	299	301	300,0
R (45) 1	400	401	400,5	299,5	299,5	299,5
R (45) 2	400	401	400,5	299	299,5	299,3
R (49) 1	399,5	399	399,3	300	301	300,5
R (49) 2	399	399,5	399,3	299,5	300	299,8
42-1	399,5	399,7	399,6	299	300	299,5
42-2	399,5	399	399,25	299	300	299,5
42-3	399,5	400	399,75	299,5	299	299,3
44-1	399	400	399,5	299	301	300,0
44-2	398	399	398,5	297	299	298,0
44-3	399	400	399,5	299	299	299,0
44-4	399	400	399,5	299	301	300,0
44-5	398	399	398,5	297	299	298,0
44-6	399	400	399,5	299	299	299,0
45-1	399,5	400,5	400	298	300	299,0
45-2	399,5	400,5	400	298	300	299,0
45-3	399	399,5	399,25	297,5	300	298,8
45-4	399,5	400,5	400	299,5	300	299,8
45-5	399,5	400,5	400	298	300	299,0
45-6	399	399,5	399,25	297,5	300	298,8
45-7	399,5	400,5	400	299,5	300	299,8
49-1	399	400	399,5	299	300	299,5
49-2	399	400	399,5	299	300	299,5
49-3	399	400	399,5	299,5	299	299,3

l = longitud de la probeta b = ancho de la probeta

Se muestran en la tabla 6.2.7 las masas por unidad de superficie promedio obtenidas en el ensayo. La tabla se organiza por número de mezcla y haciendo referencia a su aplicación en una placa de 12,5 mm de espesor, según la norma UNE 102023:1998.

Tabla 6.2.7 Masa por unidad de superficie promedio por tipo de mezcla

Número de mezcla	Fórmula (% en peso)	M (kg/m ² *)
R (42-44)	Yeso controlado 100 + A 120	8,24
R (45)	Escayola 100 + A 120	8,83
R (49)	Yeso rápido 100 + A 80	10,83
42	Yeso controlado 100 + A 120 + MG 2	6,22
44	Yeso controlado 100 + A 120 + MG 3	5,57
45	Escayola100 + A 120 + MG 3	5,55
49	Yeso rápido100 + A 80 + MG 1,6	7,69

* Placa con espesor de 12,5 mm

6.2.2.3 Análisis de resultados del ensayo de la densidad laminar

La experimentación desarrollada mostró notables diferencias en las masas por unidad de superficie entre los dos grupos de muestras que se han ensayado.

La primera relación entre los resultados se establece entre probetas fabricadas sin residuos de espuma o probetas de referencia (R) y otro grupo formado con las mismas fórmulas, pero que además contienen residuos de espuma en diferentes cantidades (tabla 6.2.8).

De la tabla 6.2.8 se extrae que se consiguió un 29% de pérdida de masa para las mezclas de yeso rápido (YR) con un 1,6% en peso de residuos de EPS, contra su muestra de referencia.

Por otro lado en la misma tabla se observa la comparación entre probetas de yeso controlado (YC100+A 120) en las cuales se observan disminuciones de masa equivalentes al 24% en mezclas con un 2% en peso de residuos MG y 32% para las mezclas (YC) con un 3% de residuos MG, ambas con relación a su muestra de referencia.

Tabla 6.2.8 Relación de la masa promedio entre probetas, por tipo de conglomerante usado y la cantidad de residuos de EPS

Conglomerante	Proporción de residuos presentes en las mezclas			
	Mezcla sin residuos (kg/m ²)	Mezclas con EPS MG 1,6 (kg/m ²)	Mezclas con EPS MG 2 (kg/m ²)	Mezclas con EPS MG 3 (kg/m ²)
Yeso rápido100+A 80	10,83	7,69	-	-
YC 100 + A 120	8,24	-	6,22	5,57
Escayola100 + A 120	8,83	-	-	5,55

La escayola E-35 fue otro conglomerante usado en el ensayo para la fabricación de muestras. De la tabla 6.2.8 se extrae que en el ensayo se obtuvo una disminución de masa equivalente al 37% entre muestra formuladas con Escayola 120 favorable a la mezcla con 3% en peso de residuos de espuma de EPS.

Tabla 6.2.9 Relación en tanto por ciento entre las masas por unidad de superficie reportadas en el experimento contra las placas comerciales.

Número de mezcla	Fórmula	Masa de la mezcla ensayada (kg/m ²)*	Disminución en peso (%)**
R (49)	YR 100 + A 80	10,83	- 8,3
49	YR 100 + A 80 + MG 1,6	7,69	23,1
R (42-44)	YC 100 + A 120	8,24	17,6
42	YC 100 + A 120 + MG 2	6,22	37,8
44	YC 100 + A 120 + MG 3	5,57	44,3
R (45)	E 100 + A 120	8,83	11,7
45	E 100 + A 120 + MG 3	5,55	44,5

* En base a una placa de 12,5 mm de espesor

** Comparada con una placa estándar de 12,5 mm con una masa de 10 kg/m²

La tabla 6.2.9 muestra las masas de las mezclas ensayadas (kg/m²) y las compara contra las masas de la placa comercial del mismo espesor (12,5 mm), donde se obtienen casi siempre resultados favorables para las probetas ensayadas; la excepción fue la mezcla YR100+A 80 (sin residuos) que resultó un 8,3% más pesada que la placa estándar equivalente. El resultado anterior se puede explicar por la ausencia en la muestra ensayada de aditivos y agregados aligerantes.

De la tabla 6.2.9 podemos notar que se obtienen mejoras en la masa por unidad de superficie simplemente al cambiar la cantidad de agua de amasado presente en las mezclas, como lo confirman las mezclas YR100+A120 y E100+A120 que son casi 18 y 12% más ligeras que la placa comercial y que podemos explicar por el aumento de porosidad que acompaña a la mayor presencia de amasado.

Las relaciones entre las masas de las probetas con agregados de espuma comparadas contra placas estándar, son ampliamente favorables para las primeras; que van desde un 37,8% menos en la mezcla YC100+A120+MG 2, hasta casi 45% en la mezcla E100+A120+MG 3.

Las probetas ensayadas fueron fabricadas por medio de vaciado en moldes abiertos, por ello algunas placas contienen una cara suave por un lado y el dorso menos terso. Las imperfecciones en el dorso de ciertas muestras se debió a la presencia de impurezas del conglomerante, o la flotación de perlas de residuo de espuma en las capas superiores del núcleo de yeso o escayola; cuando fue posible, esos defectos se corrigieron manualmente y de no lograrse la corrección la probeta de desechó.

La presencia de imperfecciones en algunas muestras pudo provocar vacíos entre el núcleo de yeso y el envolvente de cartón. Se puede argumentar que estos huecos pueden provocar distorsiones en los resultados del ensayo, sin embargo al ser tan pequeños esos huecos, la posibilidad de que impacten negativamente el experimento parece muy lejana.

6.2.2.4 Conclusiones del ensayo de la densidad laminar

- El ensayo ha evidenciado la factibilidad de producir de una manera artesanal elementos de construcción similares a las placas de yeso comerciales.

- Se ha demostrado que es posible disminuir la masa por unidad de superficie en productos similares a placas de yeso a través de dos maneras:
 - a. Manejando relaciones ricas en agua de amasado en las mezclas
 - b. Manejando mezclas que integran residuos de espuma de EPS
- Aunque la pérdida de masa se obtiene de las dos formas anteriores, el resultado es notablemente mejor si se integran residuos de espuma de EPS en una mezcla rica en agua de amasado simultáneamente.
- Se ha expuesto que las masas por unidad de superficie de las muestras ensayadas son casi siempre más ligeras que las masas de las placas de yeso estándar comercial, y que en la mayoría de los casos la diferencia es muy relevante.

6.2.3 ENSAYO DE FLEXIÓN DE PLACAS

6.2.3.1 Descripción

La prueba consiste en determinar el valor de rotura máximo de flexotracción de las placas con núcleo de conglomerante de yeso o escayola y agregados de residuos de espuma de EPS. Se busca establecer una comparación de comportamientos durante esos tipos de tensiones entre placas de yeso ya existentes en el mercado, contra muestras de cuerpos fraguados de yeso o escayola y también contra muestras que contienen residuos de espumas de EPS conglomeradas con yeso o escayola.

El ensayo se realiza con probetas con forma de lámina, las que al momento del ensayo se apoyan en sus extremos. Las probetas se doblan bajo la carga flectora y se rompen por los efectos combinados de compresión y tracción (galería 6, foto 6.11).

6.2.3.1.a Norma utilizada UNE 102035/1M:2001

El ensayo se ha basado en lo señalado en la Norma UNE 102035/1M:2001 *Placas de yeso laminado, métodos de ensayo*. Punto 9. *Resistencia mecánica a la flexión*. Esta norma corresponde con el proyecto de Norma Europea PrEN520, elaborada por el Comité Técnico AEN/CTN 102.

Se ha empleado esta norma debido a la similitud que guardan las placas de yeso existentes en la industria de la construcción y los materiales que aquí se ensayan.

6.2.3.1.b Equipo

Para la realización de los ensayos se usó el siguiente equipo e instrumental:

- Desecador
- Balanza electrónica de precisión con una exactitud de $\pm 0,1$ g marca Sartorius®
- Vernier o pie de rey Mitutoyo® con una precisión de 0,1 mm
- Flexómetro con una precisión mínima de 1,0 mm

Banco de pruebas de fabricación especial

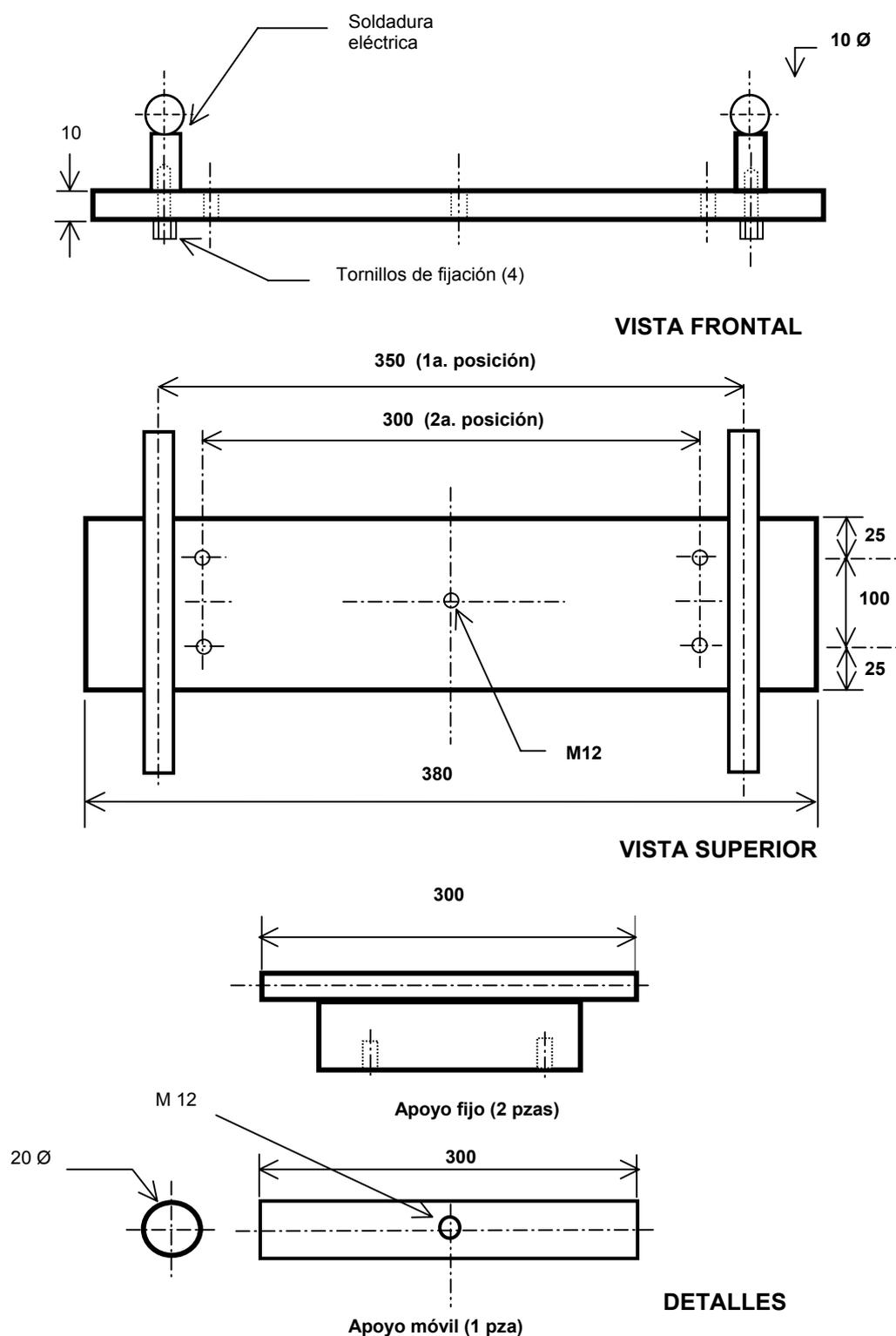


Figura 6.2.1 Dibujo del utillaje fabricado para los ensayos de flexión. Sin escala. Acotación en mm

Para la aplicación del ensayo de las placas de yeso hubo de diseñarse un banco de pruebas especial de acero que se realizó en el Taller de Mecánica de la UPC. Este utillaje cumple con el apartado 9.3 *Procedimiento* de la norma en uso. Las dimensiones del banco de prueba se ajustan a las medidas de las probetas ensayadas a flexión. La herramienta además, se empleó en otros ensayos de la misma investigación.

El banco de pruebas está constituido por una plancha de acero de 150 mm x 380 mm de base, con dos apoyos ajustables paralelos, lo que ofrece la posibilidad de dos diferentes distancias entre los apoyos (galería de fotos 6, foto 6.24).

El ensayo se aplicó en una máquina universal de pruebas que tiene un desplazamiento vertical. El banco de pruebas instalado en la platina móvil de la máquina soporta la probeta y la eleva presionando contra un rodillo fijo hasta que se produce la fractura.

- Prensa de ensayo de flexión marca LERMA® con capacidad de carga superior a 10 kN
- Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 200 kg con una señal de salida de 5000 deformaciones
- Medidor de desplazamiento Novotechnik® TR-50 con 50 mm de capacidad

6.2.3.1.c Preparación de las probetas

Las probetas ensayadas fueron de tres tipos:

1. Obtenidas de placa de yeso estándar.
2. Con núcleo de yeso o escayola sin residuos de espuma, con cara y dorso de cartón gris reciclado.
3. Con núcleo de yeso o escayola con residuos de espuma de EPS, con cara y dorso de cartón gris reciclado.

La fabricación y acondicionamiento de las probetas se ha realizado en el taller del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la UPC.

Las probetas ensayadas se fabricaron y ensayaron según lo marcado en la tabla 6.2.10.

Tabla 6.2.10 Características de las probetas a ensayar a flexión

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
Placa Comercial	No determinada	-
R (42-44)	Yeso Controlado 100% + agua 120%	YC 100 + A 120
R (45)	Escayola 100% + agua 120%	E 100 + A 120
R (49)	Yeso Rápido 100% + agua 80%	YR 100 + A 80
42	Yeso Controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC 100+A 120+MG 2
44	Yeso Controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	YC 100+A 120+MG 3
45	Escayola 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E 100 + A 120 + MG 3
49	Yeso Rápido 100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR 100+ A 80 + MG 1,6

Las dimensiones de las probetas fueron las que señala la norma:

Longitud	400 ($\pm 1,5$) mm
Ancho	300 ($\pm 1,5$) mm
Espesor	12,5 (± 1) mm

Se procuró siempre que el manejo de las probetas fuese dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la norma en cuestión. Estas condiciones son $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y $(50 \pm 5) \% \text{HR}$. Previo al inicio de la prueba se verificó el peso constante en las probetas ($\pm 10\text{g}$). El ensayo se practicó en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la ETSEIB de la UPC.

6.2.3.1.d Procedimiento

El ensayo se efectuó sobre las probetas según la dirección longitudinal de la placa y con su cara tersa hacia abajo. Se aplicó la carga de forma transversal y al centro de la placa sobre un banco de pruebas de fabricación especial, provisto con dos apoyos cilíndricos y con una separación entre ejes de 350 mm (± 1 mm). Se aplicó la carga con un rodillo de 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud (figura 6.2.1).

El procedimiento de la prueba fue el siguiente:

1. Inspeccionar la probeta.
2. Medir de los dos anchos y dos largos.
3. Medir de cuatro espesores en el eje de cada borde de la probeta.
4. Colocar la probeta de forma paralela y centrada con relación al banco de pruebas .
5. Aplicar la carga con una velocidad de 250 N/min.

Se ha obtenido el valor máximo de rotura de cada probeta mediante la obtención del promedio de los diez valores más altos reportados por el captador de fuerza y expresados en kgf.

Finalmente se ha calculado la media aritmética de los valores por clave de mezcla. Posteriormente esos resultados se han convertido a N para poder establecer una comparación con lo exigido por la norma usada en el ensayo (tabla 6.2.12).

6.2.3.2 Resultados del ensayo de flexión

Se han ensayado en total 22 probetas de tres tipos diferentes, las que han arrojado los siguientes resultados:

Tabla 6.2.11 Carga máxima de rotura a la flexión por probeta

Número de probeta	Fórmula	Carga máxima de rotura (N)
Placa Comercial - 1	No determinada	265,16
Placa Comercial - 2	No determinada	282,43
Placa Comercial - 3	No determinada	269,89
Placa Comercial - 4	No determinada	273,45
R (42-44) 1	Yeso Controlado100+A 120	237,15
R (42-44) 2	Yeso Controlado100+A 120	251,07
R (45) 1	Escayola100+A 120	260,6
R (45) 2	Escayola100+A 120	281,37
R (49) 1	Yeso Rápido100+A 80	410,77
R (49) 2	Yeso Rápido100+A 80	402,58
42-1	YC100+A 120 + MG 2	152,25
42-2	YC100+A 120 + MG 2	156,47
42-3	YC100+A 120 + MG 2	148,41
44-1	YC100+A 120 + MG 3	174,32
44-2	YC100+A 120 + MG 3	173,44
44-3	YC100+A 120 + MG 3	178,37
45-1	E100+A 120 + MG 3	167,85
45-2	E100+A 120 + MG 3	210,72
45-3	E100+A 120 + MG 3	189,6
49-1	YR100+A 80 + MG 1,6	205,23
49-2	YR100+A 80 + MG 1,6	264,88
49-3	YR100+A 80 + MG 1,6	231,59

Tabla 6.2.12 Carga máxima de rotura a la flexión promedio por tipo de mezcla

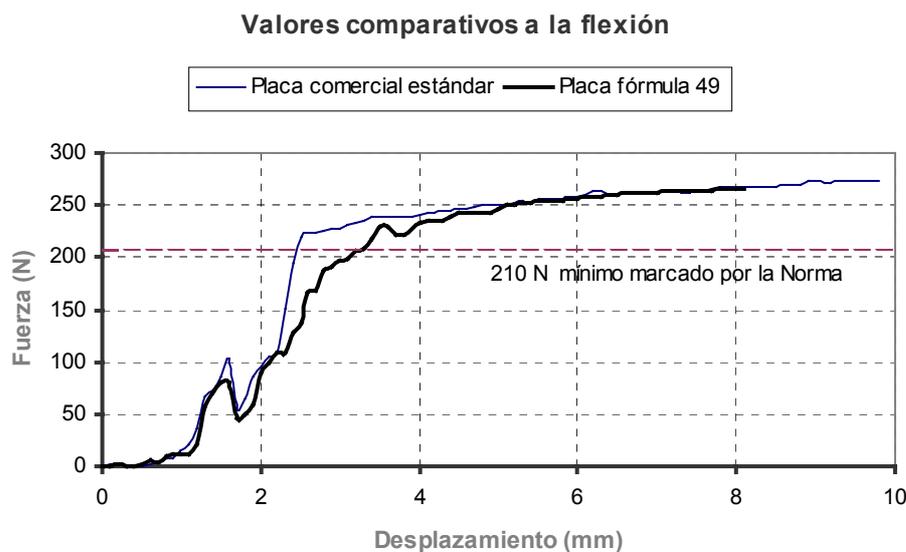
Número de la mezcla	Fórmula	Carga máxima de rotura (N)
Placa Comercial	No determinada	272,7
R (42-44)	Yeso Controlado100+A 120	244,1
R (45)	Escayola100+A 120	271
R (49)	Yeso Rápido100+A 80	406,6
42	Yeso Controlado100+A 120 + MG 2	152,4
44	Yeso Controlado100+A 120 + MG 3	175,4
45	Escayola100+A 120 + MG 3	189,4
49	Yeso Rápido100+A 80 + MG 1,6	234

6.2.3.3 Análisis de resultados del ensayo de flexión

Probetas que se han obtenido de placas de yeso estándar

Los valores obtenidos tienen como fin ser elementos de comparación para evaluar las conductas de las otras probetas fabricadas para el ensayo.

Las probetas se cortaron de la parte central una placa tipo estándar comercial de mayores dimensiones.



Gráfica 6.2.3 Comportamiento típico al esfuerzo a la flexión de una probeta comercial comparada con la mezcla 49

Debido a su proceso de fabricación a través de laminado continuo, la placa de yeso estándar tiene una mayor resistencia a la flexión en el sentido longitudinal o sea en su sentido de fabricación, que en el transversal (anisotropía). Las probetas usadas aquí se cortaron y prepararon para ser ensayadas en el sentido transversal (galería 6, foto 6.11), donde la resistencia declarada del fabricante para ese espesor (12,5 mm) es de 260 N y el valor mínimo aceptado por la Norma UNE 102023:1998 es de 210 N. Entonces el valor promedio obtenido en la prueba para las probetas comerciales es superior en casi 5% al declarado por el fabricante y supera lo exigido por la norma anterior. Gráfica 6.2.3.

Por otro lado las probetas de placa de yeso comercial están recubiertas en cara y dorso por cartón, el cual está formado por varias capas de papel especiales para esta aplicación y unidas entre sí, al tiempo que se encuentran firmemente adheridas al núcleo de yeso. Esta característica aporta notables mejoras de resistencia al producto.

El ensayo de las probetas comerciales resultó en valores homogéneos. Su fractura fue siempre repentina y sonora, al tiempo que la grieta formada no se mostró muy ramificada (foto 6.13).

Probetas sin agregados de espuma

Estas probetas que se señalan con una R previa a la fórmula de la mezcla, se han fabricado sin la presencia de residuos de espuma de EPS, con la única finalidad de servir como elemento de

comparación entre materiales con las mismas proporciones de conglomerante y agua de amasado, pero con agregados de plástico celular.

La mezcla con la mayor carga a la rotura de todo el ensayo fue la marcada con la clave R (49) (YR100+A80) con un promedio de casi 407 N lo cual representa un 49% más sobre el promedio de la mezcla comercial (273 N). El siguiente valor es la mezcla R (45) (E100+A120) con 271 N y que es casi el mismo que el de la mezcla comercial.

El tercer sitio lo ocupa la mezcla R(42-44) (YC100+A120) que tiene con un valor promedio de 144 N de carga máxima; estas probetas guardan una gran similitud de formulación con las de la mezcla R(45) (E100+A120) aunque estas últimas reportan una resistencia equivalente al 11% más, lo cual se puede explicar a los mejores comportamientos de la escayola comparados con el yeso controlado.

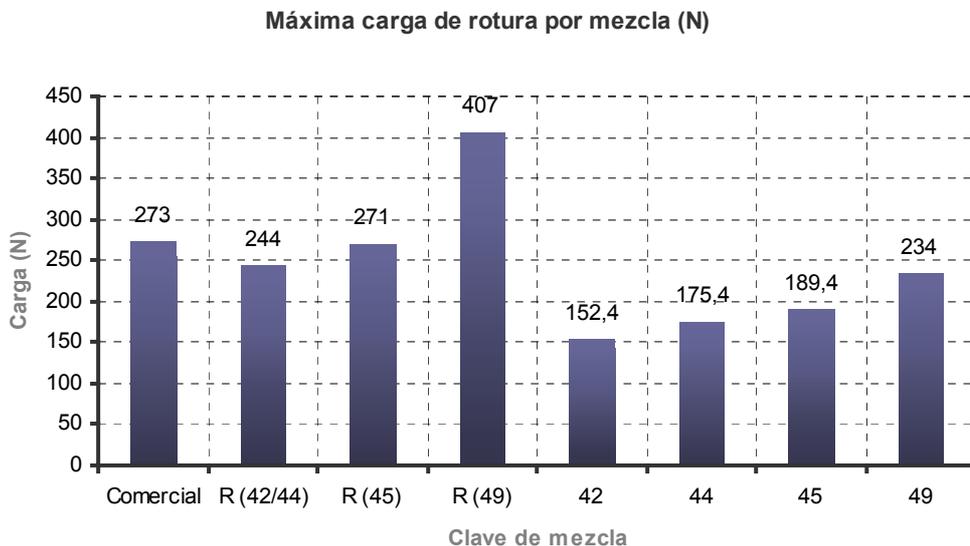
Probetas con agregados de espuma

Los valores alcanzados de carga máxima a la flexión de este grupo de materiales son menores que los alcanzados por los dos grupos anteriores.

La mayor carga conseguida para los materiales con agregados de espuma fue la mezcla 49 (YR100+A80+MG1,6) con 234 N, lo cual equivale a un 57% de la resistencia promedio para la misma mezcla sin residuos de espuma (R 49).

La segunda resistencia del grupo la tiene la mezcla 45 (E100+A120+MG 3) con 189,4 N, que equivale a 70% de la misma mezcla sin residuos de espuma de EPS (R (45), 271 N).

La mezcla 42 (YC100+A120+MG2) es la de menor resistencia promedio del total de la prueba con 152,4 N, que equivale al 62% del valor reportado por la misma mezcla sin espuma 244 N (R 42-44).



Gráfica 6.2.4 Comparación de las resistencias máximas a la flexión

6.2.3.4 Conclusiones del ensayo de flexión

- El ensayo permitió confirmar la disminución de los valores de carga máxima a la flexión que experimentan los conglomerantes de yeso o escayola, cuando han sido formulados con una alta proporción de agua de amasado o cuando se han agregado residuos de espuma de EPS, o cuando se dan las dos situaciones simultáneamente.
- Todas las muestras de placas comerciales superan la carga mínima de rotura (210 N) aceptada por la norma correspondiente y que se menciona al principio del reporte del ensayo. Las probetas fabricadas sin residuos de espuma de EPS también superan la carga mínima mencionada antes.
- De las probetas fabricadas sin residuos sólo un tipo de ellas supera al valor alcanzado por la placa comercial (mezcla R (49)) y otra de esas mezclas (R (45)) prácticamente lo iguala. Tabla 6.2.13.
- En las probetas fabricadas con residuos de espuma de EPS integrados, sólo una mezcla supera la carga mínima aceptada (mezcla 49). Los otros tipos corresponden al 90% (mezcla 45) (galería 6, foto 6.12), al 83% (mezcla 44) y al 72% (mezcla 42) del mínimo mencionado (210 N). Gráfica 6.2.4.
- A diferencia de las placas comerciales y de las formuladas únicamente con conglomerante, donde generalmente la fractura fue sonora y donde además no se produjo un desprendimiento de los recubrimientos de cartón, la rotura en las muestras con residuos de espuma de EPS se produjo de forma silenciosa y acompañada de una o varias grietas muy ramificadas. También se pudo observar la desintegración del núcleo en zonas cercanas a la fractura, además de un desprendimiento previo del recubrimiento un momento antes de que se produjese la mayor resistencia.
- Según los valores obtenidos del ensayo, la rotura de las placas comerciales y en las probetas sin residuos, se da con menores desplazamientos que aquellos alcanzados por las probetas con residuos integrados en sus núcleos, lo cual puede indicar que estos últimos materiales son más flexibles a una carga como la aplicada en el ensayo.
- La comparación entre muestras con iguales fórmulas, donde la única diferencia es la presencia o ausencia de residuos de espuma de EPS, resultó notoriamente favorable para las mezclas formuladas con yeso o escayola solamente.
- En ensayo también confirmó la importancia de la unión entre el núcleo y las cubiertas de cartón de las probetas. En ninguna de las muestras de placa comercial se dio desprendimiento de sus recubrimientos, mientras que en las probetas artesanales fue una situación común. Este hecho puede tener gran importancia para mejorar las conductas de los materiales propuestos.

6.2.4 ENSAYO DE REACCIÓN AL FUEGO DE PLACAS

La industria de la construcción reconoce las propiedades de las placas de yeso cuando son sometidas a un ataque de fuego. Es común que esos materiales se usen en edificaciones a manera de agente retardador del fuego con varios grados de resistencia, los cuales dependen de la formulación específica con la que se han fabricado las placas.

La reacción al fuego se refiere a la capacidad de ignición y a la combustibilidad de un material, más que a su disposición para dar paso o resistir al fuego. La prueba de reacción al fuego tiende a ser de menor escala y complejidad que la prueba de resistencia al fuego y se llevan a cabo en materiales sometidos a condiciones similares de su uso final.

Los comportamientos usuales de las placas de yeso ante un ataque de fuego pueden verse modificados por la presencia de agregados de residuos de espuma de EPS en su núcleo, y dada la aplicación como materiales de construcción que se pretende para estos nuevos materiales, resulta importante observar cómo inciden las perlas de plástico en la mezcla ante un ataque de esa naturaleza.

Las Euroclases son una nueva clasificación de reacción al fuego de los materiales de construcción, más completa y precisa que la actual clasificación española de cinco clases (M0, M1...M4). Las Euroclases clasifican en siete clases principales (A1, A2, B, C, D, E y F), complementadas en su mayor parte por tres clases de desprendimientos de humos (Si) y otras tres subclases que dependen del grado de caída de gotas o partículas incandescentes (di). De esta manera se pasará de una clasificación con sólo cinco niveles, a una clasificación de 40 posibles y que se señalan en la Norma UNE-EN 13501-1:2002.

Las Euroclases A1, A2, B

Son clases de productos no combustibles o poco combustibles. Son los productos más seguros contra el fuego.

Las Euroclases C, D y E

Aplica para productos que se les califica como combustibles. Son los más peligrosos en su comportamiento al fuego.

La Euroclase F

Son productos que no satisfacen ninguna de las categorías anteriores.

Las Euroclases además se complementan con otras calificaciones:

Opacidad de humos (Si)

- s1. Baja cantidad y velocidad de emisión.
- s2. Cantidad y velocidad de emisión medias.
- s3. Elevada cantidad y velocidad de emisión.

Producción de gotas o partículas inflamadas (di)

- d0. No se producen gotas ni partículas inflamadas.
- d1. No hay gotas inflamadas con una vida de más de 10 s.
- d2. Productos que no se clasifican como d0 ni d1.

Para las Euroclases, los métodos de ensayo necesarios para simular tres niveles de desarrollo de un incendio son:

- Un objeto puntual de llama pequeña
- Un objeto en llamas, como puede ser un mueble
- Un fuego plenamente desarrollado

Los métodos armonizados para evaluar la reacción al fuego de los materiales de construcción se basan principalmente en las siguientes normas:

Ensayo a la pequeña llama UNE-EN ISO 11925-2:2002

Ensayo del SBI (Single Burning Item) Ensayo de reacción al fuego UNE-EN 13823:2002

Ensayo de horno de no combustibilidad (Horno cilíndrico) UNE-EN ISO 1182:2002

Ensayo de poder calorífico superior (PCS) o de Bomba calorimétrica UNE-EN ISO 1716:2002

6.2.4.1 Descripción

El ensayo que se practica simula un ataque de llama de pequeño tamaño sobre los bordes de un material, donde el interés se centra en conocer la velocidad de propagación de la llama y la caída o no de gotas inflamadas. La prueba de reacción al fuego se considera que es un ensayo que precede a otros más complejos.

Este ensayo en particular permitirá comparar las reacciones al fuego de placas de yeso estándar contra placas de residuos de espuma de EPS molidos y conglomerados con yeso o escayola, al ser sometidos al ataque de una llama pequeña en condiciones controladas.

6.2.4.1.a Norma utilizada UNE-EN-ISO 11925-2:2002

El ensayo se ha adaptado de lo que señala la Norma UNE-EN ISO 11925-2:2002 *Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción*. Esta norma especifica un método de ensayo para determinar la inflamabilidad de los productos de construcción, mediante la aplicación directa de una llama pequeña utilizando muestras en posición vertical.

Se ha empleado esta norma debido a que va dirigido, entre otros, al ensayo de productos monocapa o multicapa especialmente planos, cuyas características marca la misma norma y que corresponden a los materiales de nuestro interés.

6.2.4.1.b Equipo

Para la realización de los ensayos se usó el siguiente equipo e instrumental:

Desecador

Balanza electrónica de precisión con una exactitud de $\pm 0,01$ g marca Mettler® modelo P1210

Mechero Bunsen para gas natural con quemador de 9 mm de diámetro y control de llama, capaz de mantener una llama estable con el quemador fijo a 45° y con una presión entre 10 kPa y 50 kPa.

Cronómetro marca Casio® con graduación mínima de 0,01 s

Bandeja metálica

Papel de base, bond color blanco

Equipos especialmente fabricados para el experimento y adaptados del diseño que señala la norma:

Soporte de pruebas descrito en el punto 6.1.2.1.a

Aparato de medición de la altura de la llama

Medidor de la distancia entre el quemador y la probeta

Soporte para asegurar la correcta inclinación del mechero

6.2.4.1.c Preparación de las probetas

Las dimensiones de las probetas usadas son diferentes de aquellas que señala la norma (250 ±1 x 90 ±1 mm); esto parece no afectar significativamente a los resultados deseados del ensayo. Las dimensiones de las probetas y sus tolerancias son:

Longitud 150 (± 1,5) mm
 Ancho 100 (± 1,5) mm
 Espesor 12.5 (± 0,5) mm

Los materiales ensayados se señalan en la tabla 6.2.13.

Tabla 6.2.13 Características de las probetas del ensayo de reacción al fuego

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
Placa estándar Comercial	No determinados	-
R (42-44)	Yeso Controlado 100% + agua 120%	YC100+A 120
R (45)	Escayola 100%+ agua 120%	E100+A 120
R (49)	Yeso Rápido 100% + agua 80%	YR100+A 80
42	Yeso Controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC100+A 120+MG 2
44	Yeso Controlado 100% + agua 120% +EPS Molido Grueso 3%	YC100+A 120+MG 3
45	Escayola 100%+ agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E100+A 120+MG 3
49	Yeso Rápido 100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR100+A 80+MG 1,6

El ensayo indica la posibilidad de aplicar la llama en el borde o en la superficie de la probeta; en la mayoría de los casos de este experimento se aplica de ambas maneras.

Las probetas que provienen de placas de yeso comerciales y las de fabricación propia sin residuos de espuma, sólo se ensayan por su borde transversal, debido a que la información disponible al respecto hace innecesario ahondar en ello.

Para el ensayo sobre la superficie de la probeta se decidió practicar el ataque sobre el dorso y no sobre la cara de la misma, ya que por su proceso de fabricación ambos lados tienen texturas diferentes (rugoso y liso respectivamente). El dorso parece ofrecer reacciones al fuego menos deseables que la superficie opuesta.

Las probetas usadas en el experimento se agruparon y se ensayaron como se describe:

1. Obtenidas de placas de yeso tipo estándar o de usos generales y de 12,5 mm de espesor.
Se ensayan en posición vertical y por un borde transversal.
2. Con núcleo de yeso o escayola sin residuos de espuma, con cara y dorso de cartón gris reciclado de 0,45 mm de espesor.
Se ensayan en posición vertical y por un borde transversal.
3. Con núcleo de yeso o escayola con residuos de EPS, con recubrimientos de cartón gris reciclado de 0,45 mm de espesor en sus caras y dorsos.

Se ensayan en posición vertical y por un borde transversal, también en posición vertical y por su dorso.

4. Con núcleo de yeso o escayola con residuos de EPS, sin recubrimientos.
Se ensayan en posición vertical y por un borde transversal, también en posición vertical y por su dorso.
Estas probetas se obtuvieron de muestras a las cuales se les retiró manualmente el recubrimiento de cartón.

Se procuró siempre que el manejo de las probetas fuese siempre dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la norma en cuestión. Estas condiciones son $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y $(50 \pm 5) \% \text{HR}$. Previo al inicio de la prueba se verificó el peso constante en las probetas ($\pm 10\text{g}$). El ensayo se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química de la UPC.

6.2.4.1.d Procedimiento

Una vez determinado el peso constante de las probetas se procedió al ensayo de las mismas.

El procedimiento de la prueba fue el siguiente:

1. Inspeccionar la probeta.
2. Medir el espesor que se expone a la llama.
3. Colocar la probeta sujeta por el soporte y en posición vertical.
4. Encender el quemador en posición vertical y permitir la estabilización de la llama. Ajustar la altura de la llama a 20 mm usando el aparato fabricado para ese fin.
5. Dependiendo del tipo de ensayo:
 - a. Si la prueba se dirige al borde expuesto de la probeta. Colocar el quemador a 45° y acercarlo con esa inclinación hasta que la llama alcance un punto preestablecido, en el centro del ancho del borde inferior de la probeta a 1,5 mm de la superficie. Para esta operación se usa el espaciador especial.
 - b. Si la prueba se dirige a la superficie del producto. Colocar el quemador a 45° y acercarlo con esa inclinación hasta aplicar la llama a 16 mm de la superficie de la probeta, sobre una línea central de la superficie de la muestra a 40 mm del borde inferior. Para esta operación se usa el espaciador especial fabricado con ese fin.
6. Poner en marcha el cronómetro al momento de que la llama hace contacto con la probeta. Aplicar la llama 30 s y después retirar suavemente el quemador. La duración total del ensayo es de 60 s; si la llama persiste en la probeta, en ese momento se ha de apagar.

6.2.4.2 Resultados del ensayo de reacción al fuego

Los resultados del ensayo se expresan de la tabla 6.2.14 a la tabla 6.2.19 y se indica para cada probeta la siguiente información:

- **Combustión con llama del recubrimiento.** Si se produce ignición y hay combustión con llama en el recubrimiento.

- **Combustión del núcleo con llama sostenida.** Si se produce combustión con llama de más de 150 mm sobre el punto de aplicación, o bien se ésta dura más de 3 s después de apartar la llama del quemador.
- **Goteo incandescente.** Si de la probeta se desprenden partículas de plástico que al caer producen ignición en el papel de base. También aplica si las partículas continúan ardiendo después de caer:
 - a. *No.* No hay ningún tipo de goteo.
 - b. *Pocas.* Hay sólo algunas partículas con una caída espaciada entre ellas.
 - c. *Muchas.* Caída masiva constante de partículas.
- **Humo.** Para la producción de humo en el ensayo se determinaron tres niveles:
 - a. *No.* Generación de muy poco humo o inapreciable a simple vista.
 - b. *Suave.* Humo apreciable a simple vista y que se termina al retirar la llama del quemador.
 - c. *Moderado.* Humo denso que continúa su intensidad al menos 3 s después de haber retirado la llama de la probeta.
- **Área afectada.** Es la superficie (en cm²) del núcleo de la probeta que se ve afectada en cualquier medida por la combustión del recubrimiento o del mismo núcleo.

Tabla 6.2.14 Resultados individuales por probeta ensayadas por un borde transversal. Placas comerciales

Probeta	Combustión con llama del recubrimiento	Combustión del núcleo con llama sostenida	Goteo incandescente	Humo	Área afectada (cm ²)
Placa estándar comercial	No	No	No	No	4
Placa estándar comercial	No	No	No	No	2
Placa estándar comercial	No	No	No	No	4

Tabla 6.2.15 Resultados individuales por probeta ensayadas por un borde transversal. Mezclas de yeso o escayola sin residuos de espuma de EPS

No.	Fórmula	Combustión con llama del recubrimiento	Combustión del núcleo con llama sostenida	Goteo incandescente	Humo	Área afectada (cm ²)
R(42-44)-1	YC100+A 120	Sí	No	No	Suave	7
R(42-44)-2	YC100+A 120	Sí	No	No	Suave	9
R (45)-1	E100+A 120	No	No	No	No	5
R (45)-2	E100+A 120	Si	No	No	Suave	3
R (49)-2	YR100+A 80	Sí	No	No	Suave	8
R (49)-1	YR100+A 80	No	No	No	No	8

Tabla 6.2.16 Resultados individuales por probeta ensayadas por un borde transversal. Mezclas con residuos de espuma de EPS y con recubrimientos

No.	Fórmula	Combustión con llama del recubrimiento	Combustión del núcleo con llama sostenida	Goteo incandescente	Humo	Área afectada (cm ²)
42-1	YC100+A 120+MG 2	No	No	No	Suave	25
42-2	YC100+A 120+MG 2	No	No	No	Suave	14
42-3	YC100+A 120+MG 2	No	No	No	No	16
44-1	YC100+A 120+MG 3	No	No	No	Suave	45
44-2	YC100+A 120+MG 3	No	No	No	No	14
44-3	YC100+A 120+MG 3	No	No	No	Suave	30
45-1	E100+A 120+MG 3	No	No	No	No	14
45-2	E100+A 120+MG 3	Si	No	No	Moderado	90
45-3	E100+A 120+MG 3	Si	No	No	Moderado	26
49-1	YR100+A 80+MG 1,6	No	No	No	Suave	38
49-2	YR100+A 80+MG 1,6	No	No	No	No	14
49-3	YR100+A 80+MG 1,6	No	No	No	Suave	25

Tabla 6.2.17 Resultados individuales por probetas ensayadas por un borde transversal. Mezclas con residuos de espuma de EPS sin recubrimientos

No.	Fórmula	Combustión del núcleo con llama sostenida	Goteo incandescente	Humo	Área afectada (cm ²)
42-4	YC100+A 120+MG 2	No	No	No	10
42-5	YC100+A 120+MG 2	No	No	No	8
44-4	YC100+A 120+MG 3	No	No	No	6
44-5	YC100+A 120+MG 3	No	No	No	9
45-4	E100+A 120+MG 3	No	No	No	6
45-5	E100+A 120+MG 3	No	No	No	5
45-6	E100+A 120+MG 3	No	No	No	16

Tabla 6.2.18 Resultados individuales de probetas con recubrimiento de cartón ensayadas por el dorso. Mezclas con residuos de espuma de EPS

No.	Fórmula	Combustión con llama del recubrimiento	Combustión del núcleo con llama sostenida	Goteo incandescente	Humo	Área afectada (cm ²)
42-6	YC100+A 120+MG 2	Sí	No	No	Suave	28
42-7	YC100+A 120+MG 2	Si	No	No	Suave	35
44-6	YC100+A 120+MG 3	Si	No	No	Suave	36
44-7	YC100+A 120+MG 3	Si	No	No	Suave	21
45-7	E100+A 120+MG 3	Sí	No	No	Suave	36
45-8	E100+A 120+MG 3	Sí	No	No	Suave	28
49-4	YR100+A 80+MG 1,6	Sí	No	No	Suave	40
49-5	YR100+A 80+MG 1,6	Sí	No	No	Suave	24

Tabla 6.2.19 Resultados individuales de probetas sin recubrimiento de cartón ensayadas por el dorso. Mezclas con residuos de espuma de EPS

No.	Fórmula	Combustión del núcleo con llama sostenida	Goteo incandescente	Humo	Área afectada (cm ²)
42-8	YC100+A 120+MG 2	No	No	No	36
42-9	YC100+A 120+MG 2	No	No	No	30
44-8	YC100+A 120+MG 3	No	No	No	17
44-9	YC100+A120+MG 3	No	No	No	21
45-1	E100+A 120+MG 3	No	No	No	18
45-2	E100+A 120+MG 3	No	No	No	24
49-5	YR100+A 80+MG 1,6	No	No	No	21
49-6	YR100+A 80+MG 1,6	No	No	No	19

6.2.4.3 Análisis de resultados del ensayo de reacción al fuego

Se han ensayado dos tipos de materiales:

- a. Placas de yeso estándar que tienen su cara y dorso recubiertos con lienzos de cartón firmemente adheridos.
- b. Placas con núcleo de yeso o escayola y agregados de residuos de espuma de EPS recubiertos en sus caras con cartón reciclado.

El proceso de fabricación de los últimos materiales produce texturas diferentes, una cara principal lisa y otra rugosa o dorso. Por esas texturas la calidad de la adhesión del cartón en ambas es diferente; mientras en la cara lisa se da una firme sujeción del cartón por el núcleo del material, en el dorso hay zonas con pequeñas protuberancias o depresiones que producen huecos entre el cartón y el núcleo. Estas anomalías parecen favorecer la combustión del recubrimiento y aumentan la dificultad en la interpretación de los resultados del ensayo.

La observación de los resultados del ensayo y su interpretación en algunos casos, como el de la densidad del humo y su olor, no son ajenos a la subjetividad propia de los sentidos del investigador. Para una exploración de reacción al fuego más completa se requiere de equipo e instrumental que ahora no están disponibles.

Placas de yeso estándar comercial ensayadas por un borde.

Aunque su composición no esta disponible, se asume que su núcleo es una mezcla de diversos tipos de sulfatos cálcicos y anhidritas con aditivos como modificadores de fraguado y aligerantes como la perlita. Ninguno de estos materiales favorece la combustión. Sus recubrimientos de cartón tampoco han mostrado tendencia a la ignición.

Estas placas hoy se comercializan con la clasificación española M1 (no inflamable) según la Norma UNE 23 727-90; esta clasificación se confirmó en la prueba. En el mercado también se encuentran placas formuladas con componentes que permiten una mayor resistencia al fuego y se califican por la misma norma como M0 (incombustibles); estos materiales no se ensayaron.

En el ensayo de las placas de yeso estándar no se observó combustión con llama ni del recubrimiento ni del núcleo. El área afectada promedio fue la más baja de toda la prueba (3 cm²) y estas no muestran más que material carbonizado sin desprendimientos. Tabla 6.2.14.

Placas de yeso o escayola y recubiertas con cartón reciclado. Ensayadas por un borde.

El núcleo de estas probetas está fabricado únicamente con conglomerante y agua de amasado en diferentes proporciones. La mezcla no mostró ninguna tendencia a consumirse con llama.

Su recubrimiento sí mostró tendencia a la ignición principalmente en zonas huecas o de deficiente sujeción por el núcleo, pero si bien la combustión se produjo, la misma no se sostuvo después de apartar la llama del mechero. El humo generado fue siempre suave y con olor a papel quemado. Tabla 6.2.15.

Probetas de yeso o escayola con residuos de espuma de EPS. Recubiertas con cartón y ensayadas por un borde.

El núcleo de las probetas generalmente no mostró tendencia a la ignición. Sólo en dos casos el recubrimiento de cartón se consumió con la presencia de llamas, mismas que se extinguieron al retirar la llama del quemador. Las llamas producidas en algunas probetas se pueden atribuir a la presencia de zonas huecas entre el núcleo y el recubrimiento, más que a una especial disposición a la ignición de esas probetas.

No se produjo goteo sobre el papel de base ni caída de carbón, pero sí de algunas cenizas provenientes del recubrimiento. Cuando se produjo humo, éste fue suave. En los casos donde se desarrollaron llamas en el recubrimiento, el humo producido fue moderado sin hollín a simple vista; en él se percibe un muy leve olor a poliestireno.

La cantidad de área promedio afectada de este tipo de materiales (29 cm^2) es mayor que la de otros que no contienen en su mezclas residuos de EPS. La mayor área afectada se reporta en la probeta 45-2 de la tabla 6.2.16 (E100+A120+MG 3) con 90 cm^2 , la cual se debe a la combustión más intensa del cartón de recubrimiento que ya se ha descrito antes.

Probetas de yeso o escayola con residuos de espuma de EPS. Sin recubrimientos y ensayadas por un borde.

Las probetas no mostraron tendencia alguna a la ignición, ni produjeron gotas ni humo observable a simple vista.

Sus zonas afectadas promedio ($8,6 \text{ cm}^2$) son menores que las probetas fabricadas con las mismas mezclas pero sin recubrimientos. Tabla 6.2.17.

La prueba también se realizó sobre el dorso de las probetas debido a que esta es una situación que puede darse en la aplicación final del producto. Se decidió atacar el dorso de las probetas debido a que se intuye en ellas una mayor tendencia a la ignición que en la cara opuesta.

Probetas con yeso o escayola con residuos de espuma de EPS y recubrimientos. Ensayadas por el dorso.

En todos los casos se produjo combustión con llama del recubrimiento con poca duración. No se dio la combustión con llama del núcleo ni goteo, aunque éste sí resultó afectado por la llama del recubrimiento. Tabla 6.2.18

El humo desprendido fue suave sin hollín y con un olor a poliestireno apenas perceptible en todos los casos, lo que se explica por la mayor presencia de residuos de plástico en las capas superiores de la cara donde se aplicó la llama. No se observan cenizas sobre el papel de base.

Probetas de yeso o escayola con residuos de espuma de EPS sin recubrimientos. Ensayadas por el dorso.

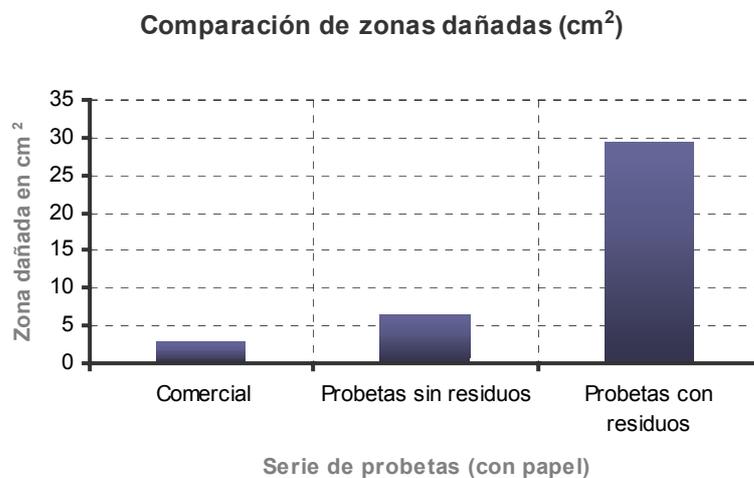
No se produjo ninguna tendencia a la combustión del núcleo, ni goteo ni humo observable a simple vista. No se observan cenizas depositadas sobre el papel de base.

Se ha observado que el conglomerante usado en este ensayo aporta al producto sus características positivas de reacción al fuego y que en ningún caso de los ensayados se produjo llama sostenida lo que al inicio se consideraba probable, dado que se usa un plástico como agregado que en su estado sólido es inflamable.

Se ha obtenido del ensayo que el material enrojece y produce una llama amarillenta y muy pequeña durante su combustión, que se extingue inmediatamente cuando se retira la llama del mechero (galería 6, foto 6.14). Esta llama la puede producir la combustión del plástico presente en la mezcla, aunque para determinar su aportación se requiere de otros ensayos más complejos. Tabla 6.2.19.

En las probetas ensayadas no se muestra un patrón de reacción a la llama bien definido en base a las proporciones de residuos y conglomerantes usados y que distinga a cada material.

Por otra parte al comparar sus promedios de zonas dañadas se observa una diferencia entre materiales comerciales y placas sin residuos de EPS, que puede explicarse por un probable uso de un aditivo que deprima su reacción al fuego por parte de las placas estándares. Otra diferencia resulta de comparar las áreas dañadas de los materiales con residuos contra aquellos que no los tienen. Gráfica 6.2.5:



Gráfica 6.2.5 Comparación entre promedios de zonas dañadas de probetas de placa que no contienen residuos y aquellas que sí los contienen

6.2.4.4 Conclusiones del ensayo de reacción al fuego

- Se han ensayado con éxito dos grupos de materiales similares. El primero de placas de yeso comercial y el segundo, un grupo de muestras de fabricación propia con tres variaciones: placa sin residuos con cartón, placa con residuos con cartón y finalmente placas con residuos sin recubrimientos de cartón.

- El ensayo ha confirmado las conductas de reacción al fuego de las placas comerciales que se señalan en la investigación preliminar de la tesis y por las cuales estos materiales son apreciados en la industria de la construcción (galería 6, foto 6.15).
- Por otra parte, el mismo ensayo ha evidenciado las conductas positivas de reacción al fuego de los materiales que contienen residuos de espuma de EPS, en las proporciones y condiciones en que se manejan aquí.
- Las comparaciones de las conductas a observar en el ensayo entre las placas comerciales y las de fabricación propia, señalan que no se dan diferencias sustanciales donde el efecto de la combustión de los recubrimientos en las probetas ensayadas (galería 6, foto 6.16), se ha de considerar un problema puntual de este experimento y del proceso de fabricación particular de los materiales descritos aquí.
- El ensayo ha evidenciado que las conductas bien conocidas de reacción al fuego del yeso y la escayola, se han potenciado en los nuevos materiales de dos maneras:
 - a. Mediante la producción de un cuerpo poroso que resulta de una mezcla rica en agua y conglomerante.
 - b. Por la integración de residuos de espuma de EPS acondicionados en el núcleo de la placa.
- Los residuos por sí mismos son cuerpos altamente porosos, lo que aumenta la cantidad de huecos en el cuerpo fraguado.
- Así, se proponen materiales para la construcción de conductas interesantes por su reacción al fuego, producto de la naturaleza del conglomerante, su alta porosidad (que retarda el avance de la llama) y a la forma cómo se da la combustión de los residuos de espuma de EPS, la cual se genera de manera aislada al encontrarse envuelta en conglomerante y que en última instancia al consumirse deja en el cuerpo sólido un nuevo poro.

Ha de recordarse que para clasificar un material en Euroclases se requiere de la aplicación de diversos ensayos que no están en este momento a el alcance del investigador, pero en base a la experiencias recabadas en la prueba y a la revisión de la literatura técnica se puede proponer una clasificación de los materiales tal como fueron ensayados.

Una probable clasificación de los productos de yeso o escayola con o sin residuos puede ser:

Tabla 6.2.20 Propuesta de clasificación en el sistema de Euroclases de los materiales ensayados

Producto	Propuesta de clasificación en Euroclases
Placa de yeso estándar	A2, s1, d0
Placa de yeso o escayola con agregados de residuos de EPS sin recubrimientos	A2, s1, d0
Placa de yeso o escayola con agregados de residuos de EPS con recubrimientos	B, s2, d0 ó C, s2, d0

De cumplirse esta clasificación permitiría (Norma UNE EN 13 501-1 y –4) que el segundo material pudiera ser usado en prácticamente todas las aplicaciones de revestimiento que tiene la placa de yeso estándar. Para el tercer material sería posible considerarlo como revestimiento de paredes de zonas de recorrido y estancia habituales y en cavidades ocultas con sistemas automáticos de extinción.

6.2.5 ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DE PLACAS

6.2.5.1 Descripción

Este ensayo tiene por objeto estudiar el comportamiento al impacto de los materiales similares a una placa de yeso, que se proponen en esta investigación.

La absorción de energía por un material como el nuestro, sujeto a cargas rápidas o de impacto, se relaciona con el tamaño y la geometría de la probeta, con la velocidad con que se aplica la carga y las condiciones de temperatura y humedad en las que se realiza el ensayo.

6.2.5.1.a Norma utilizada UNE 102035/1M:2001

El ensayo se ha adecuado en lo señalado en la Norma UNE 102035/1M:2001 *Placa de yeso laminado. Métodos de ensayo. Apartado 10. Resistencia al impacto.*

Se ha empleado esta norma debido a la similitud que guardan las placas de yeso existentes en la industria de la construcción y los materiales que aquí se ensayan.

6.2.5.1.b Equipo

Para la realización de los ensayos se contó con el siguiente equipo e instrumental:

Desecador

Trípode de altura variable y con dispositivo adecuado para el control de la caída de la bola de acero

Placa de acero como base de impacto de 15 x 400 x 400 mm

Bola de acero de 40 mm de diámetro y con una masa de 260 g

Lámpara con lupa de 150 mm de diámetro

Vernier o pie de rey Mitutoyo® con una precisión de 0,1 mm

Flexómetro con una medición mínima de 1,0 mm

6.2.5.1.c Preparación de las probetas

Se ensayan tres grupos de probetas:

1. Probetas obtenidas de placas de yeso comerciales de dos proveedores diferentes y de tipo estándar en ambos casos.

2. Probetas con mezclas que contienen yeso o escayola con cargas de residuos de EPS.
3. Probetas con mezclas que contienen yeso o escayola únicamente.

El tamaño de las probetas a ensayar según la Norma UNE 102023:1998 son 300 mm ($\pm 1,5$) x 400 mm ($\pm 1,5$). En el caso de los materiales de fabricación propia no fue posible cumplir con las medidas anteriores. De esta manera, se ensayan al menos dos probetas de cada tipo y con las dimensiones siguientes:

Longitud 300 (± 1) mm
 Ancho 200 (± 1) mm
 Espesor 12,5 (± 1) mm

Se ensayan probetas con cara y dorso recubiertas con cartón y con un núcleo formulado como se señala en la tabla 6.2.21.

Tabla 6.2.21 Características de las probetas a ensayar al impacto

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
Placa Comercial A*	No especificada	-
Placa Comercial B*	No especificada	-
R (42-44)	Yeso controlado 100% + agua 120%	YC100+A 120
R (45)	Escayola 100% + agua 120%	E100+A 120
R (49)	Yeso rápido 100% + agua 80%	YR100+A 80
42	Yeso controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC100+A 120+MG 2
44	Yeso controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	YC100+A 120+MG 3
45	Escayola 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E100+A 120+MG 3
49	Yeso rápido 100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR100+A 80+MG 1,6

* Placa de yeso laminado tipo estándar, 12,5 mm de espesor, sin especificar una marca comercial concreta

En las probetas comerciales la prueba se realizó sobre la cara de las probetas, mientras en los dos grupos restantes se aplicó el ensayo sobre la cara más lisa del núcleo de yeso o escayola.

Se buscó que el manejo de las probetas fuese siempre dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la norma en cuestión (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % HR. El ensayo se realizó en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la UPC.

6.2.5.1.d Procedimiento

El principio de la prueba señala que se busca determinar el diámetro de la huella que aparece en la placa cuando se somete a una energía potencial de 245 J. Esta energía se consiguió a través de la caída libre de una bola de acero desde una altura de 0,960 m sobre una de las caras de cada probeta. Las características de la bola de acero son: 40 mm de diámetro y una masa de 260 g.

El procedimiento de la prueba fue el siguiente:

1. Mantener las probetas a (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % HR hasta lograr probetas con masa constante.
2. Inspeccionar las probetas para comprobar que no muestren daños o fallas en las caras sobre las que se realizará el ensayo.

3. Dejar caer la bola de acero desde la altura determinada sobre la probeta que se trate. Se sometió cada probeta a cuatro caídas de bola de acero para producir cuatro huellas, buscando la mayor distancia posible entre ellas.
4. Con la ayuda de una lupa, marcar con lápiz el contorno de las marcas que se han producido sobre la placa de yeso.
5. Medir con vernier el diámetro y la profundidad máximos de las marcas.

Los resultados se han expresado como lo marca la norma en cuestión; esto es la media aritmética de los valores obtenidos por cada serie de probetas de la misma mezcla.

6.2.5.2 Resultados del ensayo de resistencia al impacto

El ensayo produjo resultados de los tres grupos de probetas y que se detallan en la tabla 6.2.22; los promedios por mezcla se ordenan en la tabla 6.2.23.

Tabla 6.2.22 Diámetros individuales de huellas de impactos y profundidades de huellas (mm)

Probeta	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _x	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P _x
Comercial A-1	18,3	18,5	18,8	17,2	18,2	1,58	2,08	2,08	1,28	1,8
Comercial A-2	18,8	17,7	18,2	18,8	18,4	2,08	1,48	1,58	2,08	1,8
Comercial A-3	18	18,5	18,4	18,3	18,3	0,98	1,28	1,08	0,98	1,1
Comercial A-4	15,8	16,2	16,3	16,7	16,3	1,08	1,08	1,18	1,88	1,3
Comercial B-1	16,6	16,4	16,4	16,8	16,6	1,38	1,18	1,08	1,48	1,3
Comercial B-2	20	16,35	16,6	16,1	17,3	1,38	1,08	1,18	1,03	1,2
R (42-44)	17,8	17,4	17,7	17,7	17,7	2,38	1,18	1,88	1,28	1,7
R (45)	14	14,9	14,65	15,5	14,8	0,78	0,78	0,78	0,98	0,8
R (49)	14,9	13,8	13,4	14,2	14,1	0,78	0,78	0,48	0,68	0,7
42-1	23,6	20,8	22,3	22,1	22,2	2,88	1,78	2,78	2,68	2,5
42-2	23	21,2	22,6	20,2	21,8	2,98	2,18	2,48	1,98	2,4
44-1	22,7	23,2	23,8	26,6	24,1	2,48	2,68	2,98	3,18	2,8
44-2	21,9	23,3	22,6	20,8	22,2	2,78	2,98	2,98	2,68	2,9
45-1	20,8	22,7	21,9	21,7	21,8	1,88	2,48	1,38	1,58	1,8
45-2	23,8	22,2	23,6	25,2	23,7	2,98	1,78	2,98	3,08	2,7
45-3	19,2	22,2	21	21,4	21,0	1,98	2,08	2,18	2,78	2,3
49-1	21,6	23	22,9	22,1	22,4	1,78	1,98	1,88	1,88	1,9
49-2	23,1	20,4	21,1	24,1	22,2	2,98	2,08	2,58	3,18	2,7

H: huella producida por el impacto

P: profundidad máxima de la huella en mm

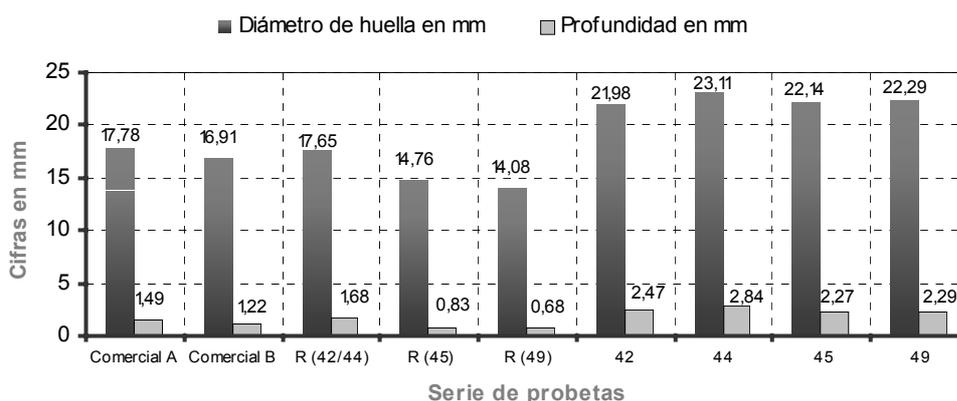
Tabla 6.2.23 Diámetros promedio de las huellas de impacto por mezcla

Clave de mezcla	Fórmula del núcleo	Diámetro (mm)	Profundidad (mm)
Placa Comercial A	Indeterminada	17,78	1,49
Placa Comercial B	Indeterminada	16,91	1,22
R (42-44)	Yeso Controlado100+A 120	17,65	1,68
R (45)	Escayola100+A 120	14,76	0,83
R (49)	Yeso Rápido100+A 80	14,08	0,68
42	Yeso Controlado100+A 120+MG 2	21,98	2,47
44	Yeso Controlado100+A 120+MG 3	23,11	2,84
45	Escayola100+A 120+MG 3	22,14	2,27
49	Yeso Rápido100+A 80+MG 3	22,29	2,29

6.2.5.3 Análisis de resultados del ensayo de resistencia al impacto

Se han ensayado al impacto los tres tipos de materiales. Los resultados del experimento se comparan en la Gráfica 6.2.6.

Diámetro y profundidad promedio de las huellas de impacto



Gráfica 6.2.6 Diámetros y profundidad de huellas promedio por mezcla

Probetas provenientes de placas de yeso laminado comercial

Las placas comerciales, aunque fabricadas por distintos proveedores produjeron datos similares. La diferencia en porcentaje entre los promedios de diámetro de huellas fue de menos de 5%.

La bola de acero generalmente produjo en estas probetas huellas bien delimitadas y circulares. Las huellas de los impactos se inspeccionaron retirando la cubierta de multipapel; a simple vista y con ayuda de la lente de aumento no se observó la presencia de grietas.

Ninguna de las huellas producidas sobre las probetas de placas de yeso comercial superó el límite de 20 mm de diámetro marcado por la Norma UNE 102035/1M:2001, en la cual se inspira este experimento.

Las conductas al impacto de estos materiales puede deberse a la presencia de un núcleo homogéneo de yeso, a la aplicación de cartón multihoja en sus caras y a una sólida unión entre ambos. (foto 6.3 y 6.4)



Foto 6.3 Adhesividad entre papel y núcleo en una probeta de placa comercial



Foto 6.4 Huella de impacto en la placa A-4 correspondiente a la serie comercial

Probetas fabricadas únicamente con yeso o escayola y agua de amasado

Éstas muestran diferencias en su cara y dorso: una cara lisa sobre la cual se realizó el ensayo y otra levemente rugosa. Esto se debe al proceso de producción empleado para su fabricación. La cara lisa tiene mejor adhesividad con el cartón gris debido a que cuenta con menos depresiones o poros abiertos, lo que aumenta el área de contacto con el material de celulosa. Este hecho parece ser de importancia en las conductas de impacto de los materiales ensayados, ya que ofrece mayor tenacidad al tener una mejor sujeción del núcleo de yeso o escayola.

Las probetas de yeso o escayola sin agregados de EPS, muestran huellas de geometrías nítidas y diámetros de huella menores que las placas comerciales en dos de las tres series ensayadas (tabla 6.2.22 y 6.2.23); para las placas de mezcla R (42-44) la dimensión promedio de las huellas es muy similar a la de las muestras comerciales, pero las mezclas R (45) y R (49), en ambos casos muestran promedios de huellas de diámetro menor hasta en un 21% que las placas comerciales (foto 6.5 y 6.6). Esto se puede explicar por los mejores comportamientos mecánicos de la escayola para el primer caso, y a una mezcla menos porosa por una menor presencia de agua de amasado para la mezcla R (49).



Foto 6.5 Huella de la probeta R (42-44) de escayola 100% + agua al 120%

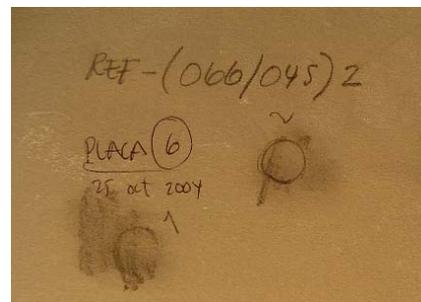


Foto 6.6 Marca de huella sobre el núcleo en la probeta de referencia R(45)

Probetas fabricadas con una mezcla de yeso o escayola y agua de amasado más residuos de espuma de EPS como agregado

Estas probetas, también como en el caso de las mezclas que no contienen agregados de espuma, muestran una cara lisa y otra rugosa, ambas cubiertas con cartón gris firmemente adherido al núcleo. La prueba se realizó sobre la cara lisa de cada probeta ya que ésta es la que ofrece una mejor sujeción de las cubiertas.

Todos los valores obtenidos para estas mezclas (42 a 49) resultaron mayores en comparación a los otros dos grupos.

Las formas de las huellas observadas en este grupo de probetas no siempre muestran una geometría constante; en ocasiones son completamente circulares y en otras son levemente ovaladas, lo que obligó en estos casos a medir la diagonal más larga (galería 6, foto 6.19).

Entre algunas huellas practicadas en la misma probeta, se observan comportamientos notoriamente diferentes en formas de huellas, sus diámetros y profundidades y que en algunas se acompaña del desgarramiento del cartón de la probeta justo en el borde de la huella. Esta conducta se puede atribuir a una heterogénea distribución de la mezcla en la probeta, al menos en la zona donde se ha producido el impacto, o bien, a partes pobres en conglomerante, lo que produce zonas de diferente concentración de residuos de espuma y con ello diferentes conductas en la misma muestra (foto 6.7 y 6.8).



Foto 6.7 Huellas sobre probeta con residuos mezcla 45 de placa

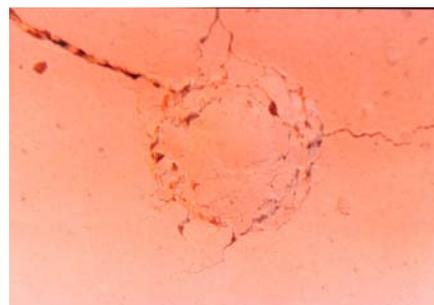


Foto 6.8 Acercamiento de huella de impacto en una probeta con residuos

La mayor diferencia entre diámetros promedio de huellas de toda la prueba, se da entre la probeta comercial B y la mezcla 44 con 23%. Si se repiten las comparaciones entre las muestras con residuos de espuma y los otros dos grupos, el primero siempre revela una menor resistencia al impacto.

Dentro de este grupo de mezclas con residuos de espuma, las medidas de huellas obtenidas son semejantes, como se observa en la tabla 6.2.22.

Las mezclas 49 (YR100+A80+MG 1,6) y 45 (E100+A120+MG 3) no obstante tener formulaciones totalmente diferentes, tienen dimensiones de huellas de impacto casi iguales.

La mayor diferencia entre los promedios de diámetro de huella se dan entre la mezcla 44 (23,11 mm) y la mezcla 42 (21,98 mm), con una diferencia equivalente al 5% entre ellas. Las dos mezclas están formuladas de manera muy parecida, con la excepción del porcentaje de espuma (2% y 3% en peso), que hace un poco menos resistente al impacto a la mezcla 44.

El ensayo ha mostrado diferentes formas de huellas de impacto que pueden indicar la mayor o menor porosidad y homogeneidad del núcleo:

- En las muestras comerciales las huellas son nítidas y redondas sin fracturas ramificadas.
- En las muestras sin residuos de espuma, las huellas son menos perceptibles pero redondas sin fracturas ramificadas.
- En las muestras con residuos de espuma, las huellas son poco nítidas y algunas veces ovaladas, muestran fracturas muy ramificadas, agrietadas y con tendencia a continuar la fractura (foto 6.8 y galería 6, foto 6.18).

6.2.5.4 Conclusiones del ensayo de resistencia al impacto

- Se ha ensayado la resistencia al impacto con éxito en dos grupos de materiales similares. En el primer grupo, dos marcas comerciales de placa de yeso estándar, y el segundo grupo de muestras de fabricación propia con dos variaciones; placas sin residuos (R) y placas con residuos integrados de espuma de EPS.
- El ensayo ha indicado que de los tres grupos ensayados, dos satisfacen el requerimiento de diámetro máximo de huella; las placas comerciales y las placas de fabricación propia sin residuos de espuma de EPS.
- El grupo de mezclas que sí contienen residuos de espuma de EPS, exceden hasta con un 15% el diámetro máximo de huella señalado en la norma correspondiente y que se indica al principio del reporte de este ensayo. Por otro lado, el promedio de la huella con mayor diámetro de este grupo, supera en 27% al promedio de la placa comercial. Ambos hechos parecen mostrar la menor resistencia al impacto por este ensayo de los elementos constructivos propuestos.
- Se ha mostrado la importancia de una buena unión entre el envolvente y el núcleo. En las muestras comerciales donde se mantuvo la sujeción después del impacto, las huellas fueron de menor diámetro y más nítidas; en las muestras de fabricación propia donde se mantuvo la sujeción del envolvente, las huellas fueron de menor diámetro.

6.3 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS PARA LA PROPUESTA DE APLICACIÓN COMO PANEL AISLANTE TÉRMICO

6.3.1 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA POR INMERSIÓN TOTAL DE PANELES

6.3.1.1 Descripción

Yeso o escayola y residuos de espuma de EPS, han sido usados para la fabricación de los materiales propuestos en esta investigación. Ambos materiales están formados por estructuras con poros que les hacen mostrar una tendencia a absorber agua del medio; esa propiedad ha sido previamente estudiada por separado y por otros investigadores. Sin embargo, para mezclas compuestas por ambos materiales, la información es escasa o inexistente, lo que lleva a la necesidad de practicar en ellas ensayos de absorción de agua, dada la importancia de esa propiedad en las aplicaciones que se pretenden para los nuevos materiales.

El ensayo tiene como objetivo la determinación de la masa de agua absorbida por probetas sumergidas totalmente en agua en condiciones y plazos controlados.

6.3.1.1.a Norma utilizada

El ensayo no ha seguido fielmente una norma en particular sino que se ha inspirado en las normas ISO 2896:2001. *Plásticos celulares rígidos. Determinación de la absorción de agua* y de la D 2842-01 *Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics*. Ambas normas son técnicamente equivalentes y su propósito es el de proporcionar medios para la comparación relativa de la tendencia a absorber agua de los materiales plásticos celulares en contacto con agua. En este caso se aplica el ensayo como medio de comparación de un plástico celular rígido y un material heterogéneo donde predomina la presencia de residuos del plástico celular.

El ensayo se ha adaptado a las normas mencionadas debido a la similitud de aplicaciones potenciales que tienen para ambos tipos de materiales en la industria de la construcción.

6.3.1.1.b Equipo

Para la realización de los ensayos se contó con el siguiente equipo e instrumental:

Desecador

Balanza electrónica marca Sartorius® con una precisión de ± 0.1 g

Termómetro marca Protón® con una capacidad de medición máxima de 27 °C y con una medición mínima de 0,10 °C

Vernier o pie de rey marca Mitutoyo® con una precisión de 0,1 mm

Flexómetro

Contrapesos de metal y tinas de inmersión

6.3.1.1.c Preparación de las probetas

Las normas indican que las probetas a ensayar serán de 150 x 150 mm por un espesor sin determinar pero menor a 7,5 mm. Sin embargo, en el caso de no disponer de materiales con esas dimensiones, se acepta el uso de otras medidas, siempre y cuando éstas tengan un ancho y un largo no menor a dos veces su espesor. También se señala que las probetas deben ser cortadas y maquinadas de manera que muestren en todas sus caras superficies planas y suaves.

Una vez obtenidas las probetas se han mantenido en atmósfera de laboratorio hasta lograr masa constante ($\pm 0,2$ g) en pesadas sucesivas.

Las probetas para este ensayo tienen las siguientes dimensiones:

Longitud	150 mm
Ancho	120 mm
Espesor	30 mm

Se han de ensayar tres probetas de cada mezcla, que se obtuvieron y adaptaron de muestras con mayores dimensiones. Las probetas de espuma de EPS virgen se cortaron con alambre caliente de una plancha; las probetas de residuos de espuma de EPS conglomeradas con yeso o escayola se cortaron con herramienta de mano.

El ensayo de absorción total de agua se aplicó con el mismo procedimiento y de manera simultánea, tanto a probetas estándar de fabricación comercial como a probetas fabricadas con los materiales de yeso o escayola y agregados de residuos de plástico; las dimensiones de los dos tipos fueron las mismas.

Se buscó en todo momento que el manejo de las probetas fuese siempre dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la norma en cuestión. El ensayo se ha realizado en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la UPC.

En la tabla 6.3.1 se describen las claves y formulaciones de las probetas que se ensayaron.

Tabla 6.3.1 Características de las probetas a ensayar a la absorción total de agua

Clave de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
Panel de EPS virgen	EPS densidad 15 kg/m ³	-
55	Escayola100% + agua 500% + EPS Molido Grueso 35,1%	E100+A 500+MG 35,1
64	Escayola100% + agua 300% + EPS Molido Grueso 14,4%	E100+A 300+MG 14,4
65	Escayola100% + agua200% + EPS Molido Grueso 8,1%	E100+A 200+MG 8,1
66	Escayola100% + agua120% + EPS Molido Grueso 6,4%	E100+A 120+MG 6,4

6.3.1.1.d Procedimiento

El procedimiento con el que se llevó a cabo el ensayo fue el siguiente:

1. Acondicionar las probetas a masa constante a (23 ± 2) °C y 50 % de HR.
2. Inspeccionar y medir dos longitudes, dos anchos y dos espesores de cada probeta. Reportar cualquier defecto en las mismas.
3. Pesar cada probeta dos veces consecutivas con una exactitud de 0,1 g.
4. Sumergir las probetas en agua común a (23 ± 2) °C y colocar sobre ellas los contrapesos. El nivel de agua deberá mantenerse en todo momento al menos 50 mm por encima de los materiales.
5. Retirar todas las burbujas que puedan producirse durante la inmersión y dejar al conjunto en reposo durante 96 horas.
6. Al cumplir el tiempo de inmersión, retirar los contrapesos y sacar la probeta de los tanques.
7. Quitar el exceso de agua de las probetas con una toalla.
8. Inmediatamente pesar cada probeta con una exactitud de 0,1 g.

Previamente a la inmersión:

Se ha determinado el volumen en cm³ y la masa de cada probeta en g, en base a los promedios de sus mediciones, así como también se ha determinado el volumen promedio por mezcla en cm³ de acuerdo a la expresión:

$$V_1 = l_x \cdot b_x \cdot d_x$$

Donde:

- V₁** Es el volumen promedio de cada mezcla en cm³
- lx** Es la longitud promedio de las probetas de cada mezcla en cm
- bx** Es el ancho promedio de cada mezcla en cm
- dx** Es el espesor promedio de cada mezcla en cm

Finalmente se ha calculado el incremento promedio en volumen (%) de agua absorbida por mezcla durante la inmersión a través de la expresión:

$$V_{\Delta} = [(M_2 - M_1) / V_1 \times \rho_{H_2O}] \times 100$$

Donde:

- V_Δ** Es la absorción en volumen de agua en porcentaje (%) absorbida por la mezcla con relación al volumen seco de la probeta, después del período de inmersión total.
- M₁** Es la masa seca promedio por tipo de mezcla en g
- M₂** Es la masa promedio después de la inmersión en g
- ρ_{H2O}** Es la densidad aparente del agua (1 g/cm³)
- V₁** Es el volumen promedio seco de la mezcla en cm³

6.3.1.2 Resultados del ensayo de absorción de agua

Se han ensayado quince probetas de cinco mezclas diferentes. La primera corresponde a las probetas de espuma de EPS virgen y que participan como probetas de referencia. En la tabla 6.3.2 se muestran las mediciones promedio que corresponden a cada probeta en seco.

Tabla 6.3.2 Dimensiones y masas promedio individuales de las probetas antes de la inmersión

probeta	lx (cm)	bx (cm)	dx (cm)	V ₁ (cm ³)	M ₁ (g)
EPS tipo III	15	12,1	3	552	6,2
EPS tipo III	15	12,1	3,1	572	6,8
EPS tipo III	15,1	12,1	3,1	563	6,3
55-1	14,9	12,1	3	531	32
55-2	15	12,1	3	548	33
55-3	15,1	12,1	3,2	578	35
64-1	15,2	12,1	3,2	579	58
64-2	15,1	12,2	3,1	578	58
64-3	15,2	12,2	3	546	55
65-1	15,1	12	3,1	560	95,8
65-2	15,2	12,1	3,1	563	95,9
65-3	15,1	12,1	3	550	87,2
66-1	15,2	12,1	2,9	539	185,9
66-2	14,9	12,2	3,2	580	166,2
66-3	14,9	12,1	3	551	166

lx = Longitud promedio (cm) bx = Ancho promedio (cm) dx = Espesor promedio (cm)

V₁ = Volumen seco promedio (cm³) M₁ = Masa seca promedio (g)

Una vez cumplido el período de 96 horas de inmersión, se ha decidido eliminar de la muestra las probetas correspondientes a las mezclas 55 y 64, debido a que después de 48 horas comenzó una rápida disolución de grandes sectores del conglomerante. Esta disolución provocó la dispersión de los residuos de plástico dentro de las tinajas, haciendo imposible la continuación del experimento para esos casos. Las características individuales promedio de las probetas después de la inmersión se concentran en la tabla 6.3.3.

Tabla 6.3.3 Dimensiones y masas promedio de las probetas después del ensayo de absorción de agua por inmersión total a 96 horas

Probeta	l_x (cm)	b_x (cm)	d_x (cm)	M_2 (g)
EPS tipo III	15,1	12,2	3,1	22
EPS tipo III	15,2	12,2	3,2	24
EPS tipo III	15,2	12,2	3,1	22
65-1	15,2	12,2	3,1	201
65-2	15,3	12,2	3,1	215
65-3	15,2	12,2	3	210
66-1	15,3	12,2	3	297
66-2	15	12,3	3,2	328
66-3	15	12,3	3,1	299

Posteriormente, con la información recabada se ha calculado el incremento individual por probeta, de absorción de agua en volumen contra su volumen seco (tabla 6.3.4).

Tabla 6.3.4 Incremento en volumen en agua de probetas ensayadas después del período de inmersión

Probeta	M_1 (g)	M_2 (g)	V_1 (cm ³)	V_{Δ} (%)
EPS tipo III	6,2	22	552	2,8
EPS tipo III	6,8	24	572	3,0
EPS tipo III	6,3	22	563	2,8
65-1	96	150	560	18,8
65-2	96	151	563	21,1
65-3	87	137	550	22,3
66-1	185,9	297	539	24,2
66-2	166,2	328	580	24,6
66-3	166	299	551	23,6

M_1 = Masa seca (g)

M_2 = Masa después del periodo de inmersión (g)

V_1 = Volumen promedio de la mezcla en seco (cm³)

V_{Δ} = Absorción total en volumen de agua (%) con relación a la probeta seca V_1

A continuación se muestran los resultados generales por mezcla y su respectiva absorción promedio (tabla 6.3.5).

Tabla 6.3.5 Absorción promedio por mezcla en volumen de agua (%)

Clave de mezcla	Fórmula	Absorción promedio V_{Δ} (%) en 96 h
Panel de EPS virgen tipo III	Indeterminada	2,9
65	Escayola100+A 200 + Molido Grueso 8,1	20,7
66	Escayola100+A 120 + Molido Grueso 6,1	24,1

6.3.1.3 Análisis de resultados del ensayo de absorción de agua

Se parte del hecho de que se enfrentan en el mismo ensayo a dos materiales con comportamientos diferentes: por un lado el EPS que es hidrofóbico o con una absorción muy baja de agua; y por el otro lado un material conglomerante como la escayola que tiende a intercambiar agua con el medio, es decir, es un material hidrofílico. Esto plantea una clara desventaja para el panel conglomerado de residuos molidos de EPS, que como se comprobó en el ensayo mostró una mayor capacidad de absorción de agua.

La absorción de agua en contacto directo con el líquido se dio en todos los materiales ensayados, lo que confirma la naturaleza porosa de los mismos y que para el caso del EPS, la absorción se da aunque la fase sólida de su estructura esté fabricada con un plástico hidrofóbico. Para el conglomerante de escayola confirma su avidez por absorber y retener agua líquida.

La serie de EPS formada por probetas de material virgen mostró una absorción promedio del 2,9%, lo que lo ubica el nivel WL(T)3 ($\leq 3,0\%$) según requisito de la Norma UNE EN 13163:2002 y aprueba el requisito especificado en la Norma UNE-EN 12087:1997, donde para el ensayo de absorción total de agua por inmersión total su valor no excederá $0,5 \text{ kg/m}^2$.

La serie 55 (E100+A 500+MG 35,1) muestra la densidad más parecida a la del material celular virgen de entre todas las series hechas con residuos de EPS y conglomerante. Esta serie se eliminó a las 48 horas de comenzada la prueba. La serie la 55 ha sido suprimida del ensayo debido a la desintegración de las probetas causada por la escasa presencia del conglomerante y su tendencia natural a disolverse en agua, lo que en última instancia le impidió retener a los residuos que no estaban totalmente envueltos en escayola. La desintegración comenzó a observarse a las 24 horas de iniciado el experimento y se hizo evidente más adelante la incapacidad del material para terminar el ensayo.

La serie 64 (E100+A 300+MG 14,4) se eliminó a las 72 horas de iniciado el ensayo y por las mismas razones que la serie 55. En estas probetas la dispersión de perlas de residuos de plástico comenzó a notarse aproximadamente a las 36 horas y el proceso de desintegración se aceleró de manera notable a las 48 horas de inmersión.

El proceso observado en las mezclas anteriores durante el experimento se resume de la siguiente forma:

1. Flotación aislada de perlas individuales que proceden principalmente de los cantos de las probetas.
2. Leve enturbiamiento del agua de ensayo y mayor presencia de perlas en flotación.
3. Mayor enturbiamiento del agua y desprendimiento de pequeños conjuntos de perlas y conglomerantes en flotación. A partir de este momento se observa una progresiva y acelerada desintegración.

4. Amarillamiento del agua de las tinas y gran cantidad de perlas o partículas en flotación.
5. Fractura de las probetas en grandes pedazos. Interrupción del ensayo para la serie que se trate.

Las series 65 (E100+A 200+MG 8,1) y 66 (E100+A 120+MG 6,4) sí terminaron el tiempo de inmersión establecido (96 horas). Esto se puede explicar a que ambos materiales están fabricados con más cantidad de conglomerante y una relación menor de residuos de plástico que las series 55 y 64. Sin embargo las probetas que corresponden a las dos primeras series muestran, en mayor o menor medida, signos de que la disolución del conglomerante también se produce y que eventualmente se presentaría la separación de los componentes de las probetas de prolongar el período de inmersión.

Por lo que respecta a la absorción, el mayor porcentaje entre los materiales propuestos se dio en la serie 66 con 24,1% el cual es 8 veces más que el que reporta la espuma virgen. La serie 65 con 20,7% de absorción es 7 veces más que las probetas de EPS.

La diferencia entre ambas series (65 y 66) se puede explicar por la mayor presencia de conglomerante y menor cantidad de espuma en la serie 66 lo que la hace más densa (280 kg/m^3 contra 193 kg/m^3 de la mezcla 65) y que le permite mantener la estructura de la probeta por más tiempo en inmersión, aunque con más absorción de agua que la probeta 65.

6.3.1.4 Conclusiones del ensayo de absorción de agua

Se han ensayado a la absorción de agua por inmersión total de agua dos tipos de materiales similares; uno homogéneo de espuma virgen de EPS y otro heterogéneo constituido por una mezcla de residuos acondicionados de espuma de EPS conglomerados con escayola. De la comparación de las conductas de ambos materiales podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Se comprueba que tanto la espuma de EPS como la escayola son materiales con tendencia a absorber agua líquida. Esto resulta de notable importancia ya que esta propiedad esta ligada íntimamente a la conductividad térmica, a la densidad y a la resistencia de los elementos constructivos que se proponen en esta tesis.
- Se ha confirmado que las espumas vírgenes de espuma de EPS ensayadas, cumplen con la norma de productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación y por lo tanto son útiles como referencia para los materiales compuestos que se proponen.
- El ensayo realizado indica que de las mezclas ensayadas de residuos de espuma de EPS conglomerados con escayola, ninguna logra los porcentajes de absorción máximos ($< 5 \%$) exigidos por la norma que aplica a espuma vírgenes de EPS.

El ensayo de absorción de agua por inmersión total, ha evidenciado la tendencia natural del conglomerante para disolverse en agua en mayor o menor medida y que depende de la fórmula específica que se trate:

- Se probaron muestras de una densidad que se acerca a la de la espuma virgen (mezcla 55) y otras que sin ser tan ligeras muestran características atractivas en este sentido (mezcla 64). Sin embargo estas dos mezclas tuvieron que ser eliminadas del ensayo debido a que al desintegrarse en el agua prematuramente, no cumplieron el tiempo requerido de inmersión determinado al inicio del ensayo (96 h). Esta conducta se puede atribuir a la escasa participación de conglomerante en la mezcla.

- Las mezclas 65 y 66 sí cumplieron con los tiempos de inmersión, debido a que ambas están formuladas con porcentajes mayores de conglomerante que en las dos mezclas anteriormente señaladas.
- De lo anterior obtenemos que si bien la inmersión total en agua de los elementos constructivos es un hecho poco frecuente, esta situación es indicadora de otros comportamientos de los nuevos materiales que refuerzan la idea que han de ser destinados para aplicaciones de edificación interior únicamente.

6.3.2 ENSAYO DE LA COMPRESIÓN DE PANELES

6.3.2.1 Descripción

Cuando se aplica una fuerza sobre un material plástico celular éste se deforma. Cuando la fuerza empuja sobre la probeta, ésta se acorta y se produce una compresión.

Se busca establecer las resistencias a la compresión que tienen los materiales fabricados con residuos de espuma de EPS conglomerados con yeso o escayola, y compararlos con los materiales de espuma de EPS virgen tipo III.

6.3.2.1.a Norma utilizada UNE 53205:2001

El ensayo se ha basado en la Norma Española UNE 53205:2001 *Plásticos. Materiales Plásticos celulares rígidos*. Se ha utilizado esta norma debido a la semejanza de aplicaciones en la construcción entre los materiales fabricados únicamente de espuma y los fabricados con residuos de espuma de EPS conglomerados con yeso o escayola.

Esta norma especifica un método para determinar tres características:

- Resistencia a la compresión
- Esfuerzo de compresión
- Módulo de compresión

En este ensayo se ha obtenido el esfuerzo de compresión relativa (σ_{10}); debido a que esa información permite una mejor comparación con los materiales de espuma virgen.

Para la clasificación de los niveles de tensión de compresión al 10% de deformación se utilizó la Norma UNE-EN 13163:2001. *Productos aislantes térmicos para las aplicaciones en la edificación*. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS). Especificaciones.

6.3.2.1.b Equipo

Para el ensayo se han utilizado el siguiente equipo:

Vernier o pie de rey marca Mitutoyo® con una precisión de 0,1 mm

Desecador

Balanza electrónica de precisión con una exactitud de $\pm 0,1$ g marca Sartorius®

Prensa de ensayo de compresión marca LERMA® con capacidad de carga superior a (10 ± 0,1) kN dotada con platos rotulados.

Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 200 kg

Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 500 kg

Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 2000 kg

Medidor de desplazamiento Novotechnik® TR-50 de 50 mm

6.3.2.1.c Preparación de las probetas

Las probetas para este ensayo son por una parte de espuma de EPS virgen y por otra de las mezclas seleccionadas en la primera etapa experimental (tabla 6.3.6).

Tabla 6.3.6 Características de las probetas ensayadas a compresión

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
Panel de EPS virgen	EPS tipo III con densidad de 15 kg /m ³	-
55	Escayola 100% + agua 500% + Molido Grueso 35,1%	E100+A 500+MG35,1
64	Escayola 100% +agua 300% + Molido Grueso 14,4%	E100+A 300+MG 14,4
65	Escayola 100% + agua 200% + Molido Grueso 8,1%	E100+A 200+MG 8,1
66	Escayola 100% +agua 120% + Molido Grueso 6,4%	E100+A 120+MG 6,4

La norma señala que en ausencia de especificaciones previas se deben ensayar al menos cinco probetas. Así se prepararon cinco probetas de espuma virgen y de cada clave de mezcla también se fabricaron al menos cinco probetas, todas con las características señaladas en la misma norma:

Base 100 (± 1) mm x 100 mm (± 1) mm
 Altura 50 mm (± 1 mm).

En lo general se cumplieron estas medidas, sin embargo debido a las características de la mezcla conglomerante y residuos de EPS, algunas probetas formuladas con ese plástico sufrieron pequeños daños en sus esquinas, en sus aristas o en sus caras durante su extracción del molde o en su acondicionamiento para la prueba. Cuando esto sucedió se asentó en las notas del ensayo y se consideró el hecho durante los análisis correspondientes.

Las probetas de espuma virgen se cortaron de una plancha más grande por medio de una máquina de corte con alambre caliente. Estas probetas cumplen con las características exigidas por la norma. No se detectó ningún incidente al respecto.

Las probetas de residuos de espuma de EPS y conglomerante se prepararon y se manejaron dentro del rango de las condiciones de temperatura y humedad que marca la norma UNE-EN ISO 291:2004 que son: (23 ± 2) °C de temperatura y (50 ± 5)% de humedad relativa. Estas probetas no se ensayaron hasta que su masa fue constante (±10 g). El ensayo se ha realizado en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la UPC.

6.3.2.1.d Procedimiento

Posterior al moldeo de las probetas se han ejecutado según el siguiente procedimiento:

1. Secar y acondicionar las probetas según la norma correspondiente.
2. Inspeccionar la probeta para certificar la ausencia de defectos en ella.
3. Medir largo, ancho y altura de cada probeta.
4. Aplicar la prueba.

Para la realización del ensayo se colocó la probeta con una de sus caras en contacto con el plato inferior en posición central, entre las dos placas de la prensa de ensayo. Se comprimió hasta lograr el 10% de su espesor inicial y se anotó la fuerza máxima alcanzada durante esa reducción.

Se ha calculado el *Esfuerzo de compresión al 10% de deformación relativa* (σ_{10}) ya que este dato es de manejo común en la industria de los plásticos celulares y que permite establecer una comparación con las conductas de los materiales ensayados.

La Norma marca el esfuerzo de los materiales por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{10} = (F_{10} / A_0) \times 10^3$$

Donde:

- σ_{10} Es el esfuerzo de compresión al 10% de deformación relativa en kPa
- F_{10} Es la fuerza correspondiente a una deformación relativa al 10% en N
- A_0 Es la sección transversal inicial de la probeta en mm²

Finalmente se ha obtenido la media aritmética de los valores obtenidos agrupados por clave de mezcla.

6.3.2.2 Resultados del ensayo de la compresión

Se han ensayado dos materiales: de espuma virgen únicamente y de residuos molidos de espumas de EPS conglomeradas con escayola. Los resultados individuales se ilustran en la tabla 6.3.7.

Tabla 6.3.7 Esfuerzo de compresión al 10% de deformación relativa por probeta

Número de Probeta	Fórmula	σ_{10} (kPa)
Panel EPS-1	Indeterminada	67,7
Panel EPS-2	Indeterminada	65,7
Panel EPS-3	Indeterminada	60,8
Panel EPS-4	Indeterminada	59,2
Panel EPS-5	Indeterminada	66,4
64-1	Escayola100+A 300 + MG 14,4	53,3
64-2	Escayola100+A 300 + MG 14,4	27,4
64-3	Escayola100+A 300 + MG 14,4	50,0
64-4	Escayola100+A 300 + MG 14,4	37,0
64-5	Escayola100+A 300 + MG 14,4	73,5
65-1	Escayola100+A 200 + MG 8,1	72,9
65-2	Escayola100+A 200 + MG 8,1	nulo
65-3	Escayola100+A 200 + MG 8,1	113,7
65-4	Escayola100+A 200 + MG 8,1	61,1
65-5	Escayola100+A 200 + MG 8,1	71,5
66-1	Escayola100+A 120 + MG 6,4	91,2
66-2	Escayola100+A 120 + MG 6,4	89,4
66-3	Escayola100+A 120 + MG 6,4	91,3
66-4	Escayola100+A 120 + MG 6,4	74,1
66-5	Escayola100+A 120 + MG 6,4	nulo

La mezcla 55 fue declarada nula debido a que por su fragilidad no resistió el esfuerzo relativo al 10% exigida para el ensayo.

Los esfuerzos promedios de la compresión resultante de las cuatro series de probetas se muestran en la tabla 6.3.8.

Tabla 6.3.8 Esfuerzo de compresión promedio al 10% de deformación relativa (σ_{10}) por tipo de material en kPa

Mezcla	Fórmula	σ_{10} (kPa)	Nivel UNE-EN 13163
Panel EPS virgen tipo III	Indeterminada	63,97	CS(10)60
64	Escayola100+A 300 + MG 14,4	48,2	CS(10)30
65	Escayola100+A 200 + MG 8,1	79,79	CS(10)70
66	Escayola100+A 120 + MG 6,4	86,5	CS(10)80

6.3.2.3 Análisis de resultados del ensayo de la compresión

Espumas vírgenes

Los datos obtenidos para las probetas de EPS sin agregados ($\sigma_{10} = 63.97$ kPa) resultaron homogéneos y se apartan sólo un 2% de la información que aparece en la literatura estudiada anteriormente (65 kPa para la espuma tipo III con una densidad nominal de 15 kg/m^3 , en tensión por compresión con deformación del 10%) [ANAPE04]. Este hecho es previsible ya que se trata de un material comercial con un proceso de obtención bien desarrollado y normalizado.

Materiales de residuos de espumas de EPS y conglomerados con escayola

Los datos obtenidos para los materiales propuestos son mucho menos regulares que los anteriores (tabla 6.3.7).

La mezcla 64 (E100+A300+MG14,4) ofrece un promedio de 48,24 kPa. Sus lecturas individuales por probeta son dispersos y muestran un esfuerzo máximo 73,53 kPa y un mínimo de 27,41 kPa. Los valores de las probetas restantes tienden a ser menos alejados entre sí: probeta 64-1 (53,3 kPa), probeta 64-3 (50,03 kPa) y probetas 64-4 (37 kPa).

La mezcla 65 (E100+A200+MG 8,1) con un valor promedio de 79,8 kPa ofrece lecturas poco regulares, con una máxima de 113,7 kPa y una mínima de 61,1 kPa. Los datos correspondientes a las otras probetas tienden a centrarse en la muestra con 72,9 y 71,5 kPa. Uno de los ensayos hubo de anularse debido a que la probeta sufrió daños durante su manipulación (tabla 6.3.7).

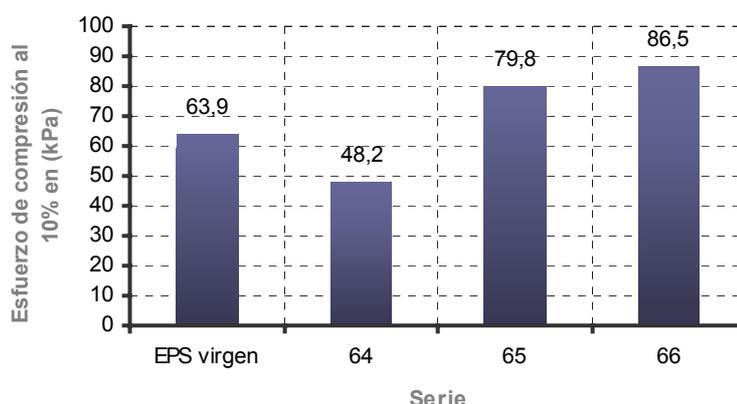
La mezcla 66 (E100+A120+MG 6,4) reporta datos más homogéneos, con un valor máximo de 91,3 kPa y que se sitúa un poco arriba del promedio 86,5 kPa (galería 6, foto 6.20). La lectura mínima es 74,1 kPa; los valores de las probetas restantes se distancian poco de estos extremos. Hubo de anularse una de las probetas ensayadas debido a que mostró daños significativos producidos durante el manejo previo al ensayo.

Las variaciones entre los datos obtenidos se pueden atribuir a diversas razones, entre ellas a las diferencias en la composición particular del residuo en lo que toca al tamaño de las perlas y a la participación de perlas trozadas y grupos de perlas seccionadas.

Pueden influir notoriamente los errores en el proceso de fabricación artesanal, como son una deficiente integración de los residuos a la mezcla por falta de tiempo de amasado, o un vaciado irregular que pueden generar en las probetas zonas ricas en aglomerante y pobres en residuos de espuma o viceversa.

También se debe considerar la probable presencia de zonas huecas producidas por la falta de conglomerante o de residuos de espuma en las mismas, debido a la ganancia de viscosidad de la mezcla durante el proceso de vaciado en moldes, fraguado y endurecimiento.

Resistencia a la compresión promedio por serie



Gráfica 6.3.1 Resistencia a la compresión (σ_{10}) alcanzada por cada tipo de material

La mezcla 64 con una relación de agua de amasado (300% en peso) mayor que en las otras probetas y un alto porcentaje de residuos (14,4% en peso), ofrece la menor resistencia a la compresión de todo el ensayo con 25% menos que la espuma virgen y con el 45% menos que la mezcla 65. Esto se puede atribuir a la porosidad del conglomerante y a la alta cantidad de residuos de la mezcla 64.

Las mezclas 65 y 66 son las de mayor resistencia a la compresión de todas las probetas ensayadas, siendo la serie 66, 8% más resistente que la serie 65. Esta diferencia se puede explicar debido a la mayor cantidad de agua de amasado (200% en peso) y mayor porcentaje de residuos de EPS (8,1% en peso) en la mezcla 65 y que provoca que la escayola fraguada sea más porosa y por lo tanto menos resistente al esfuerzo a la compresión.

Para la clasificación de los paneles según su resistencia a la compresión se usó la Norma UNE-EN 13163:2001, que señala que la tensión de compresión al 10% de deformación (σ_{10}), se determinará de acuerdo con la Norma EN 826, donde ningún resultado será inferior al valor indicado para el nivel declarado. La clasificación permitiría ubicar a los paneles de escayola con residuos de EPS analizados en los siguientes niveles:

- Mezcla 64: 48,2 kPa Nivel: **CS(10)30** Valor mínimo requerido: 30 kPa
- Mezcla 65: 79,79 kPa Nivel: **CS(10)70** Valor mínimo requerido: 70 kPa
- Mezcla 66: 86,5 kPa Nivel: **CS(10)80** Valor mínimo requerido: 80 kPa
- EPS tipo III: 63,97 kPa Nivel: **CS(10)60** Valor mínimo requerido: 60 kPa

6.3.2.4 Conclusiones del ensayo de la compresión

Se han ensayado a la compresión dos tipos de materiales similares; uno homogéneo la espuma virgen de EPS y otro heterogéneo constituido por una mezcla de residuos acondicionados de espuma de EPS conglomerados con escayola. De la comparación de las conductas de ambos materiales podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Las espuma ensayadas (EPS tipo III 15 kg/m³) coinciden en sus resultados con los señalados en la literatura técnica por lo cual se pueden considerar como elementos de comparación fiables y útiles (galería 6, foto 6.21).
- Durante el ensayo los materiales de plástico virgen mostraron conductas más constantes que las de los materiales compuestos. Esto se puede explicar en parte por el carácter artesanal de las muestras ensayadas, lo cual puede ofrecer mezclas con leves diferencias en características y proporciones de componentes y que en última instancia pueden provocar cambios en los datos obtenidos.

Del ensayo obtenemos resultados que nos señalan que dos de las tres mezclas superan en resistencia promedio a la compresión a la espuma virgen:

- La mezcla 65 con un equivalente al 24% más y la mezcla 66 con 35% más que los resultados obtenidos por el material de espuma homogéneo. La mezcla 64 indicó un resultado de 25% menor que las probetas de EPS.
- La mejor resistencia a la compresión de los materiales propuestos se puede explicar por la presencia del conglomerante de escayola, que aporta a la mezcla sus características a este tipo de esfuerzos. Así podemos observar que: a mayor presencia de agua de amasado en la mezcla la resistencia de la probeta fue menor, y a mayor participación de escayola en las muestras sus resistencias a la compresión fueron más altas.

- Estas características positivas son de gran utilidad dadas las aplicaciones constructivas que se desean para los materiales propuestos.

6.3.3 ENSAYO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PANELES

El calor se propaga siempre de un punto con temperatura alta a otro punto con temperatura más baja. De las tres maneras de transferencia de energía (conducción, convección y radiación) la conducción de calor se produce cuando hay contacto directo entre dos cuerpos que tienen diferente temperatura, o cuando entre los dos hay otro cuerpo ininterrumpido, sin la presencia de movimiento de materia. La conducción es la principal forma de transferencia de calor a través de un elemento arquitectónico vertical o un cerramiento.

El paso de calor a través de un cuerpo no siempre es el mismo; la cantidad de energía que pasa a través de un cuerpo por unidad de tiempo depende de las diferencia de temperatura entre sus dos lados, de la superficie de paso, de su grosor y finalmente de una propiedad o característica particular de ese cuerpo que llamamos coeficiente de conductividad térmica (λ). Cuando un material tiene una (λ) muy alta decimos que es un buen conductor de calor, mientras que si tiene una (λ) muy baja es un mal conductor o buen aislante.

6.3.3.1 Descripción

En la medición de la conductividad térmica mediante un equipo de placa protegida, dos probetas de espuma se colocan en contacto con las caras opuestas de una placa caliente (unidad de calefacción central). La placa caliente y las probetas son colocadas horizontalmente dentro de la cavidad de la máquina donde se busca minimizar la pérdida de calor. La relación del flujo de calor se obtiene por medio de la medición de la potencia administrada a la unidad de calefacción central.

En el equipo de una sola muestra, una de las probetas es sustituida por un elemento compuesto por un aislante y una capa protegida.

En ambos tipos de máquinas se establece una diferencia de temperatura cero y se obtienen las diferencias de temperaturas en las muestras durante el ensayo, mediante sensores de temperatura fijados en las superficies de los equipos en contacto con la muestra o en otras partes adecuadas para los fines específicos de cada ensayo.

6.3.3.1.a Norma utilizada UNE-EN 13163:2002

El ensayo se ha basado según lo establecido por la Norma UNE-EN 13163:2002. *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS)*. Donde se señala que la resistencia térmica y la conductividad térmica para esos materiales celulares rígidos se determinarán de acuerdo con la Norma UNE EN 12667:2002 *Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor*.

Se ha seleccionado esta norma para el ensayo debido a la afinidad que hay entre las espumas vírgenes de EPS y los materiales conglomerados de residuos de espuma de EPS. Otra razón importante fue la alta probabilidad de que los valores obtenidos en el ensayo quedaran entre los rangos ofrecidos por los equipos disponibles. También se ha optado por esta norma debido a que la misma señala que aunque el ensayo está orientado para materiales para construcción, también se puede usar para muestras de cualquier material que cumpla con los requisitos especificados.

6.3.3.1.b Equipo

La norma empleada contempla el uso de cualquiera de los equipos; de placa caliente guardada y del método de flujo de calor. Aquí se ha ensayado con el equipo de placa caliente protegida de una sola probeta, la misma que cumple con los principios básicos establecidos.

En base a las experiencias del personal técnico encargado de la máquina en anteriores experimentos de espumas de EPS, se han seleccionado las siguientes temperaturas de ensayo para esta prueba:

- Temperatura fría 0 °C
- Temperatura caliente 20 °C
- Temperatura media de 10 °C y un salto de 20 °C

6.3.3.1.c Preparación de las probetas

El tamaño, geometría y textura de las probetas empleadas cumplen con los requisitos de la norma y del equipo de placa caliente guardada en posición horizontal con una sola muestra.

Para el ensayo se fabricaron dos probetas con las dimensiones y tolerancias siguientes:

Longitud 600 (± 1) mm
 Ancho 600 (± 1) mm
 Espesor 50 (± 5) mm (galería 6, fotos 6.22 y 6.23).

El número de modelo y fórmula las probetas ensayadas se muestran en la tabla 6.3.9.

Tabla 6.3.9 Características de las probetas a ensayar a la conductividad térmica

Número de mezcla	Fórmula (% en peso)
65	Escayola 100% + Agua 200% + EPS Molido Grueso 8,1%

Se buscó en todo momento que el manejo de las probetas fuese siempre dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la Norma aplicada; esto es siempre en atmósfera de laboratorio y a (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % HR. El ensayo ha sido una cortesía del Laboratori del Foc i Termotecnia de la empresa Applus en la localidad de Cerdanyola, Barcelona.

6.3.3.1.d Procedimiento

Para la realización del ensayo se han seguido los siguientes pasos:

1. Mantener a la probeta en desecadora hasta obtener que su masa sea constante (± 0,5%).
2. Medir con pie de rey o vernier los espesores de la probeta en cuatro puntos, una medición en cada uno de sus ejes perpendiculares. El espesor de la muestra esta determinado por la media de la diferencia en la distancia de los cuatro puntos de lectura.
3. Seleccionar la diferencia de temperatura para esta prueba.

4. Comprobar la estabilidad de las temperaturas en el medidor del flujo de calor, la temperatura de consigna y la temperatura puntual a través de la probeta.
5. Detectar las diferencias de temperaturas de la unidad calefacción y la unidad enfriada.
6. Reportar la conductividad térmica (λ) de la probeta.
7. Comprobar que no se hayan producido cambios en las dimensiones de las probetas durante el ensayo.

Las probetas se han revisado y no se ha detectado cambio alguno después del ensayo.

Para el caso usado en el ensayo, la máquina ofrece de forma directa en su monitor las lecturas de interés. Sin embargo la norma señala para el tipo de máquina empleado el siguiente procedimiento de cálculo:

Cálculo de la conductividad térmica (λ) a través de la siguiente expresión:

$$\lambda = \Phi d / A (T_1 - T_2)$$

Para el cálculo de la Resistencia térmica (R) expresado a través de la siguiente ecuación:

$$R = (T_1 - T_2 / \Phi) A$$

Donde:

- Φ Es la media de la potencia suministrada para la sección de medición para la unidad de calefacción en W
- λ Es la conductividad térmica en W/(m·K)
- R Es la resistencia térmica en m²·K/W
- T_1 Es la media de la temperatura del lado caliente de la probeta en K
- T_2 Es la media de la temperatura del lado frío de la probeta en K
- A Es el área de medición en m²
- d Es la media de los espesores de la probeta en mm

6.3.3.2 Resultados del ensayo de la conductividad térmica

Las conductividades reportadas son las siguientes:

Tabla 6.3 10 Resultados individuales del ensayo de conductividad térmica

Probeta	Fórmula	Espesor (mm)	Conductividad térmica (λ) en W/mK
65-1	Escayola100+A 200 + MG 8,1	51	0,0633
65-2	Escayola100+A 200 + MG 8,1	55	0,0677

La conductividad térmica declarada para una espuma de EPS virgen tipo III, densidad aparente 15 kg/m^3 es de $0,039 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [ANAPE03].

6.3.3.3 Comparativa del coeficiente de conductividad térmica con otros materiales

Uno de los usos comunes de los paneles de EPS en la construcción es de el aislante térmico mediante el recubrimiento de paredes y divisiones de interiores o bien en cámaras de aire entre muros. Los paneles de EPS también se emplean en la construcción como elementos adosados a una placa de yeso laminado o como panel-sándwich con sus dos caras recubiertas con algún material laminado que le protege de golpes o del fuego [PLADUR04] [KNAUF05].

Para establecer una comparación entre los materiales con residuos de EPS conglomerados ensayados a la conductividad térmica (mezcla 65) y otros materiales de usos similares en la construcción, en la tabla 6.3.11 se muestran sus conductividades (λ):

Tabla 6.3.11 Coeficientes de Conductividad Térmica y densidades de algunos materiales de construcción* y de algunos materiales experimentales de interés

Material	Densidad (kg/m^3)	λ (W/mK)
Residuos de EPS – escayola (Mezcla 65)	193	0,065
Arcilla expandida*	300 - 450	0,08 – 0,11
Aglomerado de corcho*	110	0,039
Lana de vidrio. Tipo I*	91	0,044
Perlita expandida*	130	0,047
EPS. Tipo I*	10	0,057
PS extrusionado*	33	0,033
PU conformado Tipo I*	32	0,023
PU conformado Tipo IV*	80	0,040
Corcho – yeso ¹	578-864	0,125 – 0,199
Perlas EPS virgen – cemento ²	150 -170	0,60 – 0,064
Cemento-arena-fibra de coco ³	770 - 1561	0,175 – 0,933

* Valores seleccionados de :AENOR. *Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79*. Condiciones Térmicas en Edificios. Madrid 1979. p 63.

¹. Hernández Olivares F. (1999) Development of cork – gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*. Madrid: Elsevier Ltd. 13: 179-186.

². Laukaitis, A. et al. (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites*. Lithuania: Elsevier Ltd. 27: 41 – 47.

³. Khedari, J. et al. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*. Thailand: Elsevier Ltd. 23 (2001) 65 – 70.

De la tabla 6.3.11 podemos señalar que el coeficiente (λ) de la mezcla 65 de residuos de EPS conglomerados ($0,065 \text{ W/mK}$) es mayor que los coeficientes de las espumas aislantes de plástico. La mezcla 65 es 2,8 veces la conductividad de la espuma de PU ($0,023 \text{ W/mK}$); esta espuma es la más baja conductividad entre los materiales de la lista. Con respecto al EPS virgen, la diferencia es menor aunque todavía a favor de la espuma virgen, la mezcla 65 es mayor al EPS Tipo I ($0,057 \text{ W/mK}$) por un 14%.

En relación con otros aislantes tradicionales no de plástico, la mezcla 65 (0,065W/mK) es casi 1,5 veces que la lana de vidrio tipo I (0,044 W/mK) y menor en 40% que la conductividad de la arcilla expandida (0,110W/mK).

También con fines de comparación con otros materiales de interés para esta tesis. Se listan algunos resultados obtenidos por otros investigadores:

Del listado de materiales menos usuales o experimentales de la tabla 6.3.11, encontramos que el material 1 de corcho conglomerado con yeso [HERNA99] tiene un coeficiente (0,125 – 0,199 W/mK) de hasta 3 veces el de la mezcla 65 (0,065 W/mK). La diferencia se debe a la mayor densidad del material yeso- corcho y que el material anterior está fabricado con una cantidad menor de perlas de EPS (3% en peso del yeso) que la mezcla 65 con residuos molidos de EPS (8,1 % del peso de la escayola en g).

De Laukaitis [2005] la mezcla de perlas de EPS con cemento guarda notables similitudes con los materiales ensayados en esta investigación. Como se observa en la tabla, el material de cemento ligero tiene una densidad muy similar (150 – 170 kg/m³) con la mezcla 65 (193 kg/m³) y sus coeficientes de conductividad también son cercanos, para el material de cemento espumado se reporta (0,060 – 0,064 W/mK) mientras que para la mezcla 65 es de (0,065 W/mK).

En base a los valores de conductividad térmica declarados en la Norma NBE-CT-79, se han calculado los espesores de otros materiales usuales en la construcción que se requieren para igualar la misma conductividad térmica (0,065 W/mK) obtenida para la mezcla 65, esto es considerando que la probeta de la mezcla seleccionada ensayada (E200+MG 8,1) tiene un espesor de 3 cm.

Tabla 6.3.12 Espesores equivalentes necesarios para obtener la misma conductividad térmica en diferentes materiales para la construcción con relación a la mezcla 65

Material	Espesor (cm)
Mezcla 65 (E 100 + A 200 + EPS MG 8,1)	3
PS extrusionado	1,5
Espuma de Urea (80 kg/m ³)	1,6
Aglomerado de corcho	1,8
Lana mineral	2,2
EPS Tipo I	2,6

La tabla 6.3.12 muestra una equivalencia entre algunos materiales de construcción con respecto a sus conductividades térmicas. Se indican los espesores necesarios (cm) de esos materiales para ofrecer el mismo comportamiento térmico que un panel de residuos molidos de EPS conglomerados con escayola (mezcla 65) con 3 cm de espesor y con un coeficiente de 0,065 W/mK. Estos mismos espesores se ilustran en la figura 6.3.1.

De la tabla podemos observar que en los casos de los aislantes comunes en la construcción requieren de espesores menores hasta en un 50% (PS extrusionado) del espesor de la mezcla de residuos conglomerados con escayola (mezcla 65). Algunos otros como el EPS tipo I (10 – 12 kg/m³) se acercan a nuestro material con un 86%.

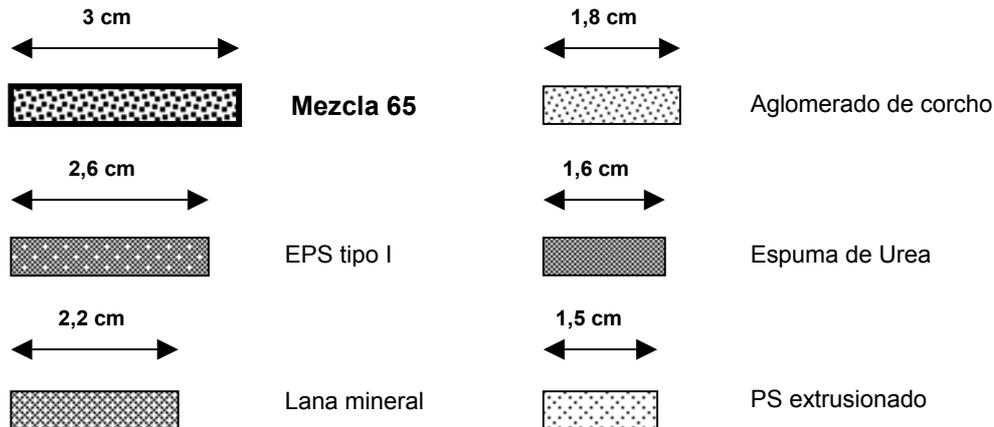


Figura 6.3.1 Representación gráfica de equivalencias de espesores necesarios para obtener el mismo aislamiento de calor de algunos materiales aislantes con relación a la mezcla 65

6.3.3.4 Conclusiones del ensayo de conductividad térmica

De los datos expuestos se puede concluir que el material ensayado (mezcla 65) tiene una conductividad térmica mayor a algunos de los materiales convencionales de aislamiento térmico en la construcción, pero que esa diferencia de comportamiento no impide que los materiales de residuos de EPS conglomerados (mezcla 65) tiendan a ser materiales competitivos donde las exigencias de aislamiento térmico no son muy elevadas; ya que ofrecen otras propiedades como ligereza, buena resistencia a la compresión y baja reacción al fuego.

6.3.4 ENSAYO DE LA DENSIDAD APARENTE DE PANELES

6.3.4.1 Descripción

El método consiste en la determinación de la densidad aparente de cada probeta a través de la relación que existe entre su masa y su volumen. Esto con el fin de utilizar esos datos en la comparación de los tipos de materiales en estudio y las características de algunas de los paneles aislantes de EPS ya disponibles en el mercado y que son de uso común en la industria de la construcción.

6.3.4.1.a Norma utilizada UNE-EN 1602:1997

El ensayo se ha adaptado de la Norma Española UNE-EN 1602:1997. *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación*. La Norma mencionada guarda gran parecido con la UNE-EN ISO 845:1996. *Plásticos y cauchos celulares*. Sin embargo esta última no contempla su aplicación para materiales destinados al aislamiento térmico de edificaciones.

Se ha utilizado la Norma UNE-EN 1602:1997 debido a la similitud de aplicaciones entre los paneles de espuma de EPS usados actualmente en la construcción y los paneles que aquí se ensayan. También se ha usado la norma en cuestión debido a que aplica para el ensayo en cuerpos moldeados con corteza.

6.3.4.1.b Equipo

Se ha utilizado el siguiente instrumental según lo indica la norma:

Horno de secado Selecta® con temperatura y humedad relativa controlados

Pie de rey o vernier marca Mitutoyo® para la determinación de los espesores con lecturas mínimas de 0,1 mm

Balanza de precisión marca Sartorius® con lecturas de aproximación a 0,1 g

Flexómetro con graduación mínima de 1,0 mm

Escuadra metálica de taller

6.3.4.1.c Preparación de las probetas

Las probetas ensayadas corresponden a las mezclas seleccionadas de la primera etapa experimental que se detallan en el punto 5.2 de esta tesis y se describen en la tabla 6.3.13.

Tabla 6.3.13. Características de las probetas sometidas al ensayo de densidad aparente

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
55	Escayola 100% + agua 500% +EPS Molido Grueso 35,1%	E100+A 500+MG 35,1
64	Escayola 100% + agua 300% +EPS Molido Grueso 14,4%	E100+A 300+MG 14,4
65	Escayola 100% + agua 200% + EPS Molido Grueso 8,1%	E100+A 200+MG 8,1
66	Escayola 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 6,4%	E100+A 120+MG 6,4

Para la realización del ensayo la norma no señala ninguna forma ni dimensión en particular para las probetas, pero sí menciona que deben de ser del mayor tamaño posible y que para materiales celulares rígidos, el área de superficie total será al menos de 100 cm². Las dimensiones de las probetas empleadas en este ensayo cumplen con esta condición ya que sus medidas fueron 30 x 300 x 400 mm.

Las probetas se fabricaron con una corteza de papel bond con el fin de permitir un más fácil manejo durante las operaciones de producción. Previo al ensayo las cortezas fueron retiradas.

Se han observado y atendido los aspectos de acondicionamiento previo de las probetas señaladas en la Norma UNE-EN ISO 291:2004, al introducirlas durante 72 horas en un recinto a (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % de humedad relativa hasta que se ha comprobado que su masa sea constante. El ensayo se ha realizado en el taller del Departamento de Proyectos Ingeniería de la UPC.

6.3.4.1.d Procedimiento

Una vez retiradas las cortezas de papel y acondicionadas las probetas hasta masa constante, se han ejecutado los siguientes pasos:

1. Revisar la probeta.
2. Determinar al menos cuatro masas de cada probeta en pesadas de forma sucesiva.

3. Medir los dos largos y los dos anchos de las probetas.
4. Medir cinco espesores. Uno en el centro de cada borde y uno más en el centro de la probeta.
5. Se ha calculado la densidad aparente (ρ_s) expresada en kg/m^3 de cada probeta a través de la siguiente fórmula:

$$\rho_s = (m / V) \times 10^6$$

Donde :

ρ_s Es la densidad global del núcleo o volumétrica de la probeta en kg/m^3

m Es la masa de la probeta en g

V Es el volumen de la probeta en mm^3

El volumen (V) de cada probeta en mm^3 , resulta de multiplicar el promedio de sus cuatro mediciones de espesores (dx) por los promedios de las mediciones de largo (lx) y ancho (bx).

Finalmente la densidad aparente por mezcla, se ha obtenido calculando la media aritmética de las densidades reportadas por cada probeta del mismo tipo, expresadas en kg/m^3 (tabla 6.3.17).

6.3.4.2 Resultados del ensayo de la densidad aparente

Los resultados de las mediciones de las masas, las longitudes, los espesores y la densidad promedio de las probetas se reportan de la tabla 6.3.14 a la tabla 6.3.17.

Tabla 6.3.14 Medición de las masas de cada probeta y su promedio

No.de probeta	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	m_4 (g)	mx (g)
55-1	202	204	202	204	203
55-2	212	214	212	214	213
55-3	220	224	220	220	221
64-1	339	339	339	340	339
64-2	342	342	341	342	342
65-1	642	642	642	642	642
65-2	602	602	602	601	602
65-3	642	642	642	642	642
65-4	642	643	643	643	643
66-1	928	928	928	928	928
66-2	928	930	930	930	930

Tabla 6.3.15 Medición de largo y ancho de las probetas y su promedio

No. de probeta	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_x (mm)	b_1 (mm)	b_2 (mm)	b_x (mm)
55-1	400	400,5	400,3	298,5	299	298,8
55-2	395	397	396	297	296	296,5
55-3	401	402	401,5	297	299	298
64-1	401	400	400,5	296	297	296,5
64-2	401	399	400	296	296,5	296,3
65-1	401	400,5	400,8	297	298	297,5
65-2	399,5	401	400,3	299	297,5	298,3
65-3	399,5	399	399,3	297,5	298	297,8
65-4	394,5	395	394,8	297	295	296
66-1	398	401	399,5	298	297,5	297,8
66-2	400	400,5	400,3	298,5	299	298,8

Tabla 6.3.16 Medición de los espesores de cada probeta y su promedio

No. de probeta	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_4 (mm)	d_5 central (mm)	d_x (mm)
55-1	30,1	29,4	26,3	26,3	28,2	28,060
55-2	29,2	25,0	29,9	29,4	29,3	28,560
55-3	30,2	26,1	27,2	25,5	27,8	27,360
64-1	27,8	26,6	26,6	28,7	26,9	27,320
64-2	29,7	28,8	26,4	26,7	28,4	27,990
65-1	28,5	27,6	29,8	29,2	27,8	28,580
65-2	30,2	27,6	30,7	27,5	26,9	28,580
65-3	25,8	27,6	27,7	26,4	27,4	26,970
65-4	28,1	29,5	24,9	28,3	28,6	27,880
66-1	31,8	27,6	28,6	27,0	27,8	28,550
66-2	30,5	27,3	30,8	27,7	27,8	28,810

Tabla 6.3.17 Densidades promedio por tipo de mezcla

No. de serie	Fórmula (% en peso)	ρ (g/cm ³)	ρ (kg/m ³)	Ratio**
55	Escayola100+A 500 + MG 35,1	0,06	64	4,3
64	Escayola100+A 300 + MG 14,4	0,10	104	6,9
65	Escayola100+A 200 + MG 8,1	0,19	193	12,7
66	Escayola100+A 120 + MG 6,4	0,28	280	18,1

**Ratio: relación entre la densidad de un panel con agregados de EPS y la densidad de un panel de EPS virgen ambos de 30 mm de espesor

6.3.4.3 Análisis de resultados del ensayo de la densidad aparente

La cantidad de agua de amasado empleada y la proporción de residuos presentes en la mezcla son los dos factores principales que determinan las densidades aparentes obtenidas en este ensayo. Se desprende de la tabla 6.3.17 que hay sustanciales diferencias entre las mezclas obtenidas:

La densidad más baja es la de la mezcla 55 (64 kg/m^3) la cual es sólo un 23% de la mezcla 66 (280 kg/m^3) que resultó con la densidad más alta. Esta diferencia se debe a que la fórmula de mezcla 55 tiene 548% más de residuos de espuma y esta fabricada con 4,1 veces más de agua de amasado.

La relación descendente de la mezcla 55 con las otras dos densidades fue de 61% con la mezcla 64 (104 kg/m^3) y de 34% con la mezcla 65 (193 kg/m^3).

La mezcla 65 tiene una densidad aparente de 30% menos que la mezcla 66. Las razones de esta disminución se encuentran en las diferentes proporciones de agua y de residuos, en ambos casos mayor en la mezcla 65. Tabla 6.3.17.

La densidad de la mezcla 64 es un 38% de la mezcla 66. Esta diferencia se debe a que la fórmula de mezcla 64 tiene 110% más de residuos de espuma y 0,6 más veces agua de amasado.

Dada la notable baja densidad del poliestireno expandido que se usa como material de referencia (15 kg/m^3), resulta imposible acercarse a estas cifras con otros materiales conglomerados de yeso como los que se proponen en esta tesis. De la tabla 6.3.17 se desprende que sin embargo se pueden lograr densidades atractivas con las mezclas de residuos conglomerados con escayola, como la que se obtiene para la mezcla 55 que resulta con un ratio de 4,3 veces más pesada. La mezcla 66 con una cantidad mayor de conglomerante y menos residuos de plástico celular resulta hasta 18 veces más densa que el material espumado (EPS) de referencia.

También del ensayo se puede establecer que las mezclas ensayadas (55, 64, 65 y 66) muestran por lo general una densidad más baja con relación a otros nuevos materiales desarrollados con yeso o escayola y EPS o con componentes similares (capítulo 3, apartado 3.4). Esos materiales no tienen como fin principal el de ser aislantes térmicos sin embargo resulta una de sus propiedades más importantes:

Olivares, et al [1999] desarrollaron un material formado por yeso y residuos de corcho donde las proporciones de corcho son del 20% del peso del yeso que a su vez esta amasado con dos diferentes proporciones de agua 0,6 y 0,8 de la masa seca. Las probetas yeso-corcho muestra densidades aparente entre $578-664 \text{ kg/m}^3$ que representa al menos entre 2,06 y 2,37 veces la densidad de la mezcla 66 (280 kg/m^3). El material yeso-corcho se propone como un material adecuado para la fabricación de paneles para particiones interiores.

Por su parte, Río Merino [2002] aplica un material formado con partículas de corcho y escayola en la fabricación de placas para sistema patentado de particiones y trasdosados. El material está formulado con corcho en una proporción de 20 y 25% en peso de la escayola y amasado con 0,6 de agua además de otros componentes como fibra de vidrio y aditivos. El corcho puede ser sustituido por perlas preexpandidas de EPS un 3% en peso de la escayola. Con esos materiales se obtiene una mezcla que una vez fraguada muestra densidades entre 500 y 600 kg/m^3 que equivalen a 1,8 y 2,1 veces la densidad de la mezcla 66 (280 kg/m^3) y entre 2,6 y 3,1 veces la mezcla 65 (193 kg/m^3)

Otro material de interés para esta investigación es el desarrollado por Laukaitis, et al [2005] que esta compuesto por 2 tamaños de perlas preexpandidas de EPS (gruesos y finos) y residuos molidos del mismo plástico. Como conglomerante se usa cemento espumado al cual

se le agregan aditivos; no se especifica la cantidad de agua de amasado empleada para la preparación de la mezcla. Las proporciones del cemento y las partes de espuma que forman cada tipo de mezcla se manejan en relaciones de volumen 1:1 (una parte de cemento y una de EPS) 1:2 y 1:3. Las densidades que se obtienen en estos materiales son bajas comparadas contra otros tipos de cemento ($1000-1500 \text{ kg/m}^3$) lo cual es explicable por la alta participación de EPS. La mínima densidad obtenida en el trabajo experimental de este grupo de investigadores fue de 149 kg/m^3 que corresponde a una mezcla fabricada con perlas grandes y una alta proporción de EPS (1:3) que representa un 93% de la densidad de la mezcla 65 (193 kg/m^3) y es 1,4 veces la densidad de la mezcla 64. Este trabajo, aunque elaborado con un conglomerante diferente (cemento espumado) resulta el material de densidad aparente más cercano a las mezclas 64, 65 y 66, desarrolladas en esta tesis.

Laukaitis señala que las muestras con mayor densidad corresponden a aquellas que contienen residuos molidos en su composición y las de menor densidad generalmente están fabricadas con perlas gruesas de EPS.

6.3.4.4 Conclusiones del ensayo de la densidad aparente

Para determinar su densidad aparente, se han ensayado un grupo de cuatro diferentes mezclas de residuos acondicionados de espuma de EPS conglomerados con escayola, donde la proporción del plástico es notoriamente mayor. Las conclusiones son las siguientes:

- Los datos del ensayo señalan que con los materiales propuestos se obtienen densidades altas (desde 64 hasta 280 kg/m^3) comparadas con la espuma virgen de EPS (15 kg/m^3).
- Se ha logrado disminuir las densidades de las mezclas a través de la combinación de dos estrategias; aumentando la proporción de agua de amasado en la proporción del conglomerante y aumentando la relación de residuos de espuma de EPS presentes en las mezclas. Evidentemente no puede esperarse igualar la densidad de la espuma virgen, debido a que la masa del plástico celular debe agregarse a la masa del conglomerante, situación prevista desde el inicio de la prueba.
- El ensayo ha demostrado que con las mezclas experimentadas se pueden obtener densidades atractivas para su aplicación en elementos constructivos.

6.3.5 ENSAYO DE FLEXIÓN DE PANELES

6.3.5.1 Descripción

La prueba consiste en determinar el valor de rotura máximo de flexión. Se busca establecer una comparación de comportamientos durante esos tipos de tensión entre los paneles de espuma de EPS y los paneles que se investigan. Estas probetas están fabricadas de residuos de espuma de EPS molidos y conglomerados con escayola, además tienen un recubrimiento de cartón o papel que busca mejorar sus prestaciones mecánicas.

El ensayo se realiza con probetas con forma de prisma de base rectangular las que al momento del ensayo se apoyan en sus extremos. Las probetas se doblan bajo la carga flectora y se rompen por los efectos combinados de compresión y tracción.

6.3.5.1.a Norma utilizada UNE 53204-2:2001

El ensayo se ha adaptado de lo que señala la Norma UNE 53204-2:2001 *Paneles de espuma rígidas. Materiales plásticos. Materiales celulares rígidos. Parte 1. Métodos de ensayo para determinar la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en flexión aparente*. Para la clasificación de los paneles según su resistencia a la flexión se utilizó la Norma UNE-EN 13163:2001. *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS). Especificaciones*.

El ensayo se ha basado en esta norma debido a:

- Las altas proporciones de residuos de espuma de poliestireno expandido que se usan para fabricar las probetas en investigación, indican la conveniencia a considerarlas para efectos del ensayo como un plástico celular y no como otro material.
- La similitud en usos potenciales en la construcción que hay entre los paneles de espuma de EPS y los paneles de mezclas de residuos de espuma conglomerados.

6.3.5.1.b Equipo

Para la realización de los ensayos se contó con el siguiente herramental de taller y el equipo de laboratorio que satisface la norma:

Molde metálico de fabricación especial

Desecador con controles de humedad y temperatura

Balanza electrónica de precisión con una exactitud de $\pm 0,1$ g marca Sartorius®

Vernier o pie de rey Mitutoyo® con una precisión de 0,1 mm

Flexómetro con una medición mínima de 1,0 mm

Prensa de ensayo de flexión marca LERMA® con capacidad de carga superior a $(10 \pm 0,1)$ kN

Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 200 kg con una señal de salida de 5000 deformaciones

Medidor de desplazamiento Novotechnik® TR-50 de 50 mm

Ordenador de sobremesa

Banco de pruebas de fabricación especial y que se describe en el ensayo de flexión 6.2.4.

6.3.5.1.c Preparación de las probetas

Las dimensiones de las probetas cumplen con lo se que señala en el apartado 5 *Probetas*, de la norma usada:

Longitud	400 ($\pm 1,5$) mm
Ancho	120 ($\pm 1,5$) mm
Espesor	30 (± 1) mm

Las probetas de espuma virgen se obtuvieron de un panel de mayores dimensiones (del tipo III con una densidad nominal de 15 kg/m^3) del que se seccionaron con cortadora de alambre caliente hasta las dimensiones señaladas.

Para la obtención de las probetas conglomeradas con yeso o escayola se hizo necesaria la fabricación de un molde de acero. A través de este utillaje se produjeron muestras de mayores dimensiones que las requeridas, por lo cual hubo que cortarlas a lo largo con una navaja.

Las probetas se cubrieron en su cara lisa con cartón gris de reciclado (0,45 mm de espesor) y en su dorso con hoja de papel bond. Una vez endurecidas las probetas, se ha pegado por su cara lisa una cubierta de cartón gris; esta operación busca facilitar el manejo de las probetas durante su manejo, a la vez de reforzar sus prestaciones mecánicas en uso. El recubrimiento de papel se usó para dar un mejor acabado al dorso de la probeta y ha sido retirado apenas endurecieron las muestras

Una vez moldeadas las muestras se conservaron en ambiente de laboratorio durante 21 días, después se cortaron al tamaño necesario para la realización del ensayo y se mantuvieron en desecador hasta conseguir una masa constante ($\pm 2\text{g}$).

Se ensayaron al menos tres probetas de cada grupo. Las formulaciones usadas para fabricarlas se describen en la tabla 6.3.18.

Tabla 6.3.18 Características de las probetas con forma de prisma rectangular a ensayar a flexión

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
Panel de EPS virgen	EPS tipo III densidad 15kg/m^3	-
55	Escayola 100% + agua 500% + EPS Molido Grueso 35,1%	E100+A 500+MG 35,1
64	Escayola 100% + agua 300% + EPS Molido Grueso 14,4%	E100+A 300+MG 14,4
65	Escayola 100% + agua 200% + EPS Molido Grueso 8,1%	E100+A 200+MG 8,1
66	Escayola 100% + agua 120% + EPS Molido Fino 6,4%	E100+A 120+MG 6,4

En todo momento se buscó que el manejo de las probetas se hiciese siempre dentro de un ambiente controlado de temperatura y humedad a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y $(50 \pm 5) \% \text{ HR}$. Previo al inicio de la prueba se verificó el peso constante en las probetas conglomeradas de escayola ($\pm 10\text{g}$). Para las probetas de EPS la Norma UNE 53204-1:2001 señala las condiciones para la realización del ensayo que son las mismas que se describen anteriormente, aunque indica que pueden utilizarse otras que reflejen el uso final del material. El ensayo se ha realizado en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la UPC.

6.3.5.1.d Procedimiento

El ensayo se efectuó sobre las probetas preparadas según la dirección longitudinal de la placa y con su cara hacia abajo. Se aplicó la carga de forma transversal y al centro de la placa sobre un banco de pruebas de fabricación especial, provisto con dos apoyos cilíndricos de 10 mm de diámetro y una longitud de (300 ± 1) mm cada uno y con una separación entre ejes de (300 ± 1) mm. Se aplicó la carga con un rodillo de 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud y con una velocidad de 250 N/min (galería 6, foto 6.24).

Una vez logrado el peso constante de las probetas de escayola y residuos de EPS, el procedimiento de la prueba fue el siguiente:

1. Inspeccionar la probeta.

2. Medir sus dos anchos y dos largos.
3. Medir de los cuatro espesores al centro de cada borde de la probeta.
4. Colocar la probeta sobre los apoyos del utillaje, de forma paralela y centrada con relación al banco de pruebas.
5. Aplicar la fuerza a una velocidad constante a (20 ± 1) mm/min.

Se han recolectado los datos del ensayo a través de un ordenador y un programa informático. Se han anotado la carga de rotura en kg para cada probeta y su respectivo desplazamiento en mm. Después se ha tabulado los valores y se ha obtenido la media aritmética por mezcla. Al final se ha obtenido la resistencia a la flexión (σ_b) por mezcla en kPa mediante la fórmula expresada en la norma que se atiende en el ensayo:

$$\sigma_b = 1,5 F_R (L / bd^2) 10^6$$

Donde:

- σ_b Es la resistencia a la flexión en kPa
 F_R Es la fuerza máxima de aplicación en kN
 L Es la distancia entre apoyos en mm
 b Es la anchura de la probeta en mm
 d Es el espesor de la probeta en mm

6.3.5.2 Resultados del ensayo de flexión

Se ensayaron cuatro grupos de probetas, los resultados individuales a fuerza última en N y su respectivo desplazamiento en mm se muestran en la tabla 6.3.19.

Tabla 6.3.19 Fuerza última y desplazamiento a la flexión por probeta ensayada

Mezcla	Fórmula	Desplazamiento (mm)	Fuerza última (N)
Panel de EPS-1	-	32,7	31,1
Panel de EPS-2	-	35,2	31,2
Panel de EPS-3	-	30,9	26,7
55-1	E100+A 500+MG 35,1	9,4	5,8
55-2	E100+A 500+MG 35,1	12,7	7,8
55-3	E100+A 500+MG 35,1	11,2	8,8
64-1	E100+A 300+MG 14,4	21,1	50,4
64-2	E100+A 300+MG 14,4	41,7	33,2
64-3	E100+A 300+MG 14,4	34,8	45,08
65-1	E100+A 200+MG 8,1	33,5	86,2
65-2	E100+A 200+MG 8,1	11,3	83,2
65-3	E100+A 200+MG 8,1	36,9	84,1
65-4	E100+A 200+MG 8,1	16,0	79,7
66-1	E100+A 120+MF 6,4	3,2	43,2
66-2	E100+A 120+MF 6,4	3,1	22,4
66-3	E100+A 120+MF 6,4	3,0	31,7
66-4	E100+A 120+MF 6,4	2,4	49,7

La media aritmética por grupo de mezcla se exponen a continuación:

Tabla 6.3.20 Fuerza última y desplazamiento promedios por serie ensayada

Mezcla	Fórmula	Desplazamiento (mm)	Fuerza última (N)	σ_b (kPa)	Nivel UNE-EN13163 equivalente
Panel EPS	Tipo III, 15 kg/m ³	32,9	29,7	124,6	BS115
55	E100+A 500+MG 35,1	11,1	7,5	31,4	N/C
64	E100+A 300+MG 14,4	32,5	42,9	180,2	BS170
65	E100+A 200+MG 8,1	24,4	83,3	349,9	BS350
66	E100+A 120+MF 6,4	2,9	36,8	154,4	BS150

N/C = No clasificado

6.3.5.3 Análisis de resultados del ensayo de flexión

Se han ensayado dos tipos de materiales:

EPS virgen

Las probetas ensayadas arrojaron datos homogéneos tanto en la fuerza última aplicada como en su correspondiente desplazamiento.

El dato promedio del conjunto de estas probetas arroja una fuerza última de 29,7 N y una resistencia a la flexión (σ_b) de 124,6 kPa, que excede en 24% al valor mínimo para este tipo de EPS (100 kPa) el cual se ha determinado en la literatura técnica revisada (Foto 6.25). Por otro lado este dato también permite aprobar el punto 4.2.7 de la Norma EN-UNE 13163:2002 que señala un mínimo de resistencia de 50 kPa para la manipulación de estos plásticos.

El desplazamiento a la fractura de las espumas ensayadas resultan en un grupo de mediciones homogéneas en las tres probetas, con una diferencia de 13% entre el desplazamiento máximo y el mínimo de las mezclas.

Residuos de EPS conglomerados con escayola

Son cuatro las mezclas de este tipo que se han ensayado:

La mezcla 55 (E100+A500+MG 35,1) mostró una serie de datos con poca dispersión. Es la más rica en residuos de espuma y la que mayor cantidad de agua de amasado se ha empleado en su fabricación, por lo cual también es la más ligera de los materiales propuestos. Su fuerza última promedio (7,5 N) se produjo con poco desplazamiento (11,1 mm) y su resistencia a la flexión resultó la más baja de todas las probetas (31,4 kPa).

Algunas de las probetas de esta mezcla no rompieron en su centro sino que la fractura se produjo en alguno de los extremos de la misma, especialmente en las zonas que apoyan sobre el banco de pruebas. Esto se puede explicar debido a la heterogeneidad de la mezcla de conglomerante y de residuos molidos de espuma de EPS a lo largo de la probeta, producto ello de una fabricación defectuosa y que obligó a declarar nulos varios ensayos.

La mezcla 55 resulta un material muy quebradizo y con tendencia a romperse durante su manejo. Su resistencia a la flexión es sólo de un 25% de las espumas vírgenes y se encuentra un 37% debajo de la resistencia mínima requerida por la norma (50 kPa).

Los datos que aporta el ensayo acerca de la mezcla 64 (E100+A300+MG 14,4) son menos homogéneos que en las dos series anteriores. Los valores de la mezcla 64 resultaron muy superiores a los de la mezcla 55, aunque se produjo repetidas veces el rompimiento de las probetas en puntos alejados de su eje transversal y por razones parecidas, lo que obligó a declarar nulos o a repetir algunos ensayos.

Los valores promedio de la mezcla 64 señalan que su fuerza última y su resistencia a la flexión promedio (σ_b) son superiores en aproximadamente un 30% a las probetas de espuma virgen, pero con un desplazamiento prácticamente igual.

La resistencia a la flexión (σ_b) de la mezcla 65 (350 kPa) es notablemente superior que a la de la espuma virgen (124 kPa) aunque su desplazamiento es menor en 26% (galería 6, foto 6.28).

Las mezclas 65 y 66 guardan similitud en sus fórmulas, las diferencias se encuentran en la cantidad de agua para amasado que se ha empleado (200% y 120% respectivamente) y el tipo de residuo molido, ya que en la mezcla 66 se ha empleado del tipo MF (molido fino) para su fabricación. Los valores reportados muestran notables diferencias a favor de mezcla 65 (tabla 6.3.20) (galería 6, foto 6.26) en sus valores de fuerza última (F_R) y de resistencia a la flexión (σ_b) hasta de un 230% más y con un desplazamiento mucho mayor. Esto nos puede describir un material más resistente y más flexible.

Las razones para estas conductas diferentes con fórmulas aparentemente similares se pueden encontrar entre otras, en el uso de residuo de espuma con molido más fino (MF) en la mezcla 66, lo que permite una mayor presencia de conglomerante por unidad de volumen, a lo que se suma una menor cantidad de agua de amasado. Así, las probetas de la mezcla 65 pesaron un 30% menos que las probetas de la mezcla 66. De esta manera tenemos que esta última mezcla es un material más pesado y más rígido que la mezcla 65.

En la norma UNE-EN 13163 [2001] especifica que la resistencia a la flexión, σ_b , se determinará según la norma EN 12089, donde ningún resultado de ensayo será inferior a los valores indicados en la Norma para el nivel declarado.

Los paneles se clasificarían según la Norma UNE-EN 13163 como sigue:

- Mezcla 64: 180,2 kPa Nivel: **BS170** Valor mínimo requerido: 170 kPa
- Mezcla 65: 349,9 kPa Nivel: **BS359** Valor mínimo requerido: 350 kPa
- Mezcla 66: 154,4 kPa Nivel: **BS150** Valor mínimo requerido: 150 kPa
- Panel EPS: 124,6 kPa Nivel: **BS115** Valor mínimo requerido: 115 kPa

6.3.5.4 Conclusiones del ensayo de flexión

- Se han ensayado a la flexión dos tipos de materiales, uno de espuma virgen de EPS y otro mezcla de residuos de espuma de EPS conglomerados con escayola; de este último material se ensayaron cuatro variaciones.
- Los resultados obtenidos para las espumas vírgenes ensayadas (tipo III de 15 kg/m³) fueron homogéneos y satisfacen los valores mínimos de resistencia a la flexión marcados por la norma correspondiente y coinciden con los indicados en la literatura técnica revisada en la etapa de información preliminar (50 kPa). Su rompimiento

siempre se dio de maneras similar; al centro de la probeta, de forma sonora y repentina. Así se puede considerar a estos materiales como elementos de comparación confiables para el resto de los materiales ensayados.

De la comparación de conductas entre materiales obtenemos lo siguiente:

- Las mezclas de residuos de EPS conglomeradas que se han ensayado ofrecieron valores poco constantes con tendencia a la dispersión, lo que se puede atribuir a las características poco homogéneas de los residuos empleados y a proporciones de los componentes de cada mezcla con leves diferencias, producto de la fabricación artesanal de las probetas; no obstante ofrecen información útil y valiosa. Tabla 6.3.22.
- Las mezclas de residuos de EPS conglomeradas, arrojaron datos que indican que 3 de las 4 series de probetas ensayadas de estos materiales superan con facilidad los mínimos marcados para las espumas vírgenes. Sin embargo una de estas mezclas reportó valores muy por debajo de los mínimos de la norma (mezcla 55).
- Atendiendo los desplazamientos obtenidos en las resistencias máximas a la flexión, observamos que una de las mezclas (mezcla 64) tiene una resistencia superior equivalente a un 44% y prácticamente el mismo desplazamiento que el material de espuma virgen.
- Las dos mezclas restantes (65 y 66) señalan resistencias mayores aunque también menores desplazamientos (galería 6, foto 6.27).
- Podemos entonces establecer que la mayor presencia de residuos y menos agua de amasado en la mezcla producen un material con más fuerza última a la flexión, pero con menos desplazamiento durante el ensayo. Esto se puede atribuir entre otros factores, a una mayor cantidad de conglomerante en la mezcla el cual es menos poroso y más quebradizo. Se refuerza esta idea al observarse los promedios de la mezcla (66) que por su composición es una probeta más pesada que las otras de su grupo y con una resistencia mayor a la de la espuma virgen, pero con un desplazamiento equivalente sólo al 9% de esta última.

6.3.6 ENSAYO DE REACCIÓN AL FUEGO DE PANELES

El poliestireno expandido es un material común y con diversas aplicaciones en la industria de la construcción. Un uso habitual para estos materiales es el de panel aislante térmico. Como todos los plásticos, este material celular siempre despierta críticas acerca de la seguridad en su aplicación en edificaciones.

Los comportamientos usuales de los paneles de espuma de EPS virgen ante un ataque de fuego han sido estudiados por otros investigadores, sin embargo para nuestros intereses esa información sólo es útil como referencia para los materiales que aquí se proponen.

Dada la aplicación como materiales de construcción que se pretende dar a los nuevos materiales, resulta importante observar y comparar las reacciones al fuego que se dan al ensayar paneles de EPS y paneles de residuos de espuma de EPS conglomerados con yeso o escayola.

6.3.6.1 Descripción

La prueba consiste en comparar las reacciones de dos productos; la espuma de poliestireno expandida (EPS) de características estándar en la industria de la construcción y sin

modificación alguna, y los residuos molidos de espuma de EPS conglomerados con yeso o escayola en al ser sometidos ambos al ataque de una flama pequeña en condiciones controladas.

6.3.6.1.a Norma utilizada UNE 53127:2002

El comportamiento de un producto en relación a como reacciona al fuego se refiere tanto a su aplicación final como a las propiedades del material y el ataque térmico. Así que habrá de ensayarse el comportamiento del producto para reflejar su uso final. Un producto durante su aprovechamiento puede tener diferentes comportamientos y aplicaciones.

El ensayo se ha adaptado en lo que señala la Norma UNE 53127:2002. *Plásticos celulares. Determinación de las características de combustión de probetas en posición horizontal sometidas a una llama pequeña.* Esta norma especifica un método de ensayo para determinar la inflamabilidad de los productos de construcción mediante la aplicación directa de una llama pequeña utilizando muestras en posición horizontal.

Para el diseño y elaboración del experimento también se ha considerado la Norma UNE-EN ISO 11925-2:2002. *Ensayo de reacción al fuego de los materiales de construcción cuando se someten a la acción directa de la llama. Parte 2. Ensayo con una fuente de llama única.*

La norma europea especifica un método de ensayo para la determinación de la inflamabilidad de los productos de construcción mediante la aplicación de llama pequeña, con radiación nula y utilizando muestras en posición vertical.

Se han seleccionado estas normas por la similitud que guardan los dos tipos de materiales ensayados, además de las aplicaciones finales en la construcción que se buscan para los nuevos materiales.

6.3.6.1.b Equipo

Para la realización de los ensayos se usó el siguiente equipo e instrumental:

Desecador

Pie de rey o vernier marca Mitutoyo® con lecturas mínimas de 0,1 mm

Balanza electrónica de precisión con una exactitud de $\pm 0,01$ g marca Mettler® modelo P1210

Mechero Bunsen para gas natural con quemador de 9 mm de diámetro y control de llama, capaz de mantener una llama estable con el quemador fijo a 45° y con una presión entre 10 kPa y 50 kPa

Cronómetro marca Casio® con graduación mínima de 0,01 s

Bandeja metálica de base

Equipos especialmente fabricados y adaptados según la norma:

Soporte de probetas en posición horizontal y de fabricación especial

Aparato de medición de la altura de la llama

6.3.6.1.c Preparación de probetas

Se ensayaron al menos tres probetas de cada grupo. Las formulaciones usadas para fabricarlas se describen en la tabla 6.3.21.

Las probetas de espuma virgen se obtuvieron de un panel de mayor tamaño y se seccionaron con una cortadora de alambre caliente.

Las probetas de materiales conglomerados se cortaron con herramienta de mano de un panel de mayor tamaño. Una vez cortadas al tamaño se les retiró la corteza de cartón o papel con las que se fabricaron.

Tabla 6.3.21 Características de las probetas del ensayo de reacción al fuego

Número de mezcla	Fórmula extendida	Fórmula condensada
Panel de EPS virgen	Tipo III, densidad 15 kg/m ³	-
55	Escayola 100% + agua 500% + EPS Molido Grueso 35,1%	E100+A 500+MG 35,1
64	Escayola 100% + agua 300% + EPS Molido Grueso 14,4%	E100+A 300+MG 14,4
65	Escayola 100% + agua 200% + EPS Molido Grueso 8,1%	E100+A 200+MG 8,1
66	Escayola 100% + agua 120% + EPS Molido Fino 6,4%	E100+A 120+MG 6,4

Las medidas de las probetas usadas tienen mayor espesor que las que señala la norma (150 x 50 x 13 mm) y son las siguientes:

Longitud 150 (± 10) mm
 Ancho 50 (± 1) mm
 Espesor 30 (± 1) mm

La razón para este cambio en las dimensiones de las probetas es la dificultad de manejar materiales conglomerados con ese espesor sin el uso de un refuerzo como papel o cartón, el cual ha de ser retirado para el ensayo.

Como lo indica la norma, una vez cortadas las probetas se marcaron con líneas transversales a los 25, 60 y 125 mm con relación al borde donde se aplicó el ensayo.

Se procuró siempre que el manejo de las probetas fuese siempre dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la norma en cuestión. Estas condiciones son (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % HR. Previo al inicio de la prueba se verificó el peso constante en las probetas (± 1 g). El ensayo se ha realizado en los laboratorios de Ingeniería Química de la UPC.

6.3.6.1.d Procedimiento

Una vez retirada de las probetas las cortezas de cartón o papel y obtenido el peso constante de los conglomerados se procedió al ensayo.

El procedimiento de la prueba fue el siguiente:

1. Inspeccionar la probeta.
2. Medir el espesor del borde transversal que se expone a la llama.
3. Colocar la probeta sobre el soporte en posición horizontal.

4. Encender el quemador en posición vertical y permitir la estabilización de la llama. Ajustar la altura de la llama a 30 mm usando el aparato fabricado para ese fin.
5. Acercar la llama al extremo de la probeta hasta que haga contacto con la misma, dejando una separación de aproximadamente 13 mm entre el borde del quemador y la probeta y que se miden usando el aparato fabricado para ese fin.
6. Poner en marcha el cronómetro al momento de que la llama hace contacto con la probeta. Aplicar la llama según el tiempo de exposición determinado y después retirar suavemente el quemador.

6.3.6.2 Resultados del ensayo de reacción al fuego

Los resultados del ensayo se expresan abajo y para cada probeta se indica la siguiente información:

- **Tiempo de exposición.** Es el tiempo en segundos que la llama del mechero se mantiene sobre la probeta.
- **Combustión con llama sostenida.** Si se produce combustión, ésta se da con llamas de más de 150 mm de altura sobre el punto de aplicación o bien, si la llama dura más de 3 s con cualquier altura.
- **Goteo incandescente.** Si de la probeta se desprenden cenizas o partículas de plástico que producen ignición en el papel de base o bien, si las partículas continúan ardiendo después de caer.
- **Área afectada.** Es la superficie (en cm²) de la probeta que se ve afectada de forma evidente por la llama del mechero o por la combustión de sí misma.
- **Humo.** Para la producción de humo en el ensayo se determinaron tres niveles:
 - a. *No* (muy poco humo o inapreciable a simple vista).
 - b. *Suave* (poco humo y que se termina apenas retirar la llama).
 - c. *Moderado* (humo denso de color blanco o negro con el olor característico del poliestireno, que continúa su intensidad al menos 3 s después de haber retirado la llama de la probeta).

Tabla 6.3.22 Resultados individuales por probeta de espuma virgen

Material	Tiempo de exposición (s)	Combustión con llama sostenida	Goteo incandescente	Área afectada (cm ²)	Humo
Panel EPS-1	15	Si	No	14	No
Panel EPS-2	15	Si	No	12	No
Panel EPS-3	15	Si	Mínimo	12	No

Tabla 6.3.23 Resultados individuales por probeta con residuos de EPS

Mezcla	Tiempo de exposición (s)	Combustión con llama sostenida	Goteo incandescente	Área afectada (cm ²)	Humo
55-1	60	No	cenizas	11,5	Suave
55-2	60	No	cenizas	10,6	Suave
55-3	60	No	No	8,9	No
64-1	60	No	cenizas	10,2	No
64-2	60	No	cenizas	9,2	No
64-3	60	No	cenizas	8,6	No
65-1	60	No	cenizas	9	No
65-2	60	No	cenizas	7,4	No
65-3	60	No	cenizas	10	No
66-1	60	No	cenizas	6,4	No
66-2	60	No	cenizas	5,4	No
66-3	60	No	cenizas	5,6	No

6.3.6.3 Análisis de resultados del ensayo de reacción al fuego

El experimento está diseñado para que se produzca ignición en la probeta o sobre la probeta, la llama avance hasta alcanzar una de las marcas transversales, lo cual determina uno de los elementos de cálculo del ensayo denominado como longitud quemada (L_d); el otro elemento es la duración de combustión (t_b). Este hecho no se dio en nuestro ensayo, ya que el ataque sobre el plástico produjo una llama que se extinguió al apartar el quemador de la probeta, por lo cual $L_d = 0$ y $t_b = 0$. Al no existir ignición evidente como formación de llama después de apartar el mechero, se considera a esta espuma como NO combustible por este ensayo.

De las probetas de espuma se tiene que, casi de manera uniforme, no se produjo goteo incandescente ni humo, si bien se observó en una de las probetas la caída de pequeñas partículas que se apagaron al tocar el papel de base. Esto se atribuye a la baja densidad del plástico celular (15 kg/m^3) y a la poca duración (15 s) del ataque.

La superficie dañada (en cm^2) es similar en las tres probetas de EPS, y se refiere en su caso a estructuras del material que se han colapsado y densificado. Esto deja en las probetas huecos rodeados de plástico quemado sobre sus paredes. El promedio de superficie dañada para las tres probetas es de $12,6 \text{ cm}^2$ (ver tabla 6.3.22) (galería 6, foto 6.29 y 6.30).

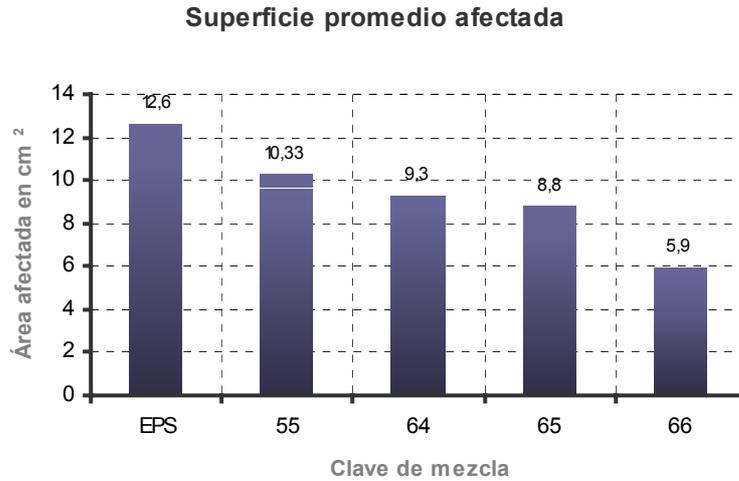
Las muestras de residuos de espuma conglomeradas con escayola tampoco produjeron ignición ni combustión en ningún caso, no obstante que se les sometió a un ataque de llama más prolongado (60 s) (galería 6, foto 6.31). Por lo tanto estos materiales son NO combustibles por este ensayo. La reacción se puede atribuir a la presencia de la escayola y que siendo un material inerte al fuego, envuelve a las perlas evitando que el fuego se extienda de unas a otras y a la baja participación de poliestireno sólido en el conjunto (tabla 6.3.23)

En las probetas la estructura dañada se muestra como un frágil conjunto de sulfato cálcico carbonizado en mayor o menor medida y de pequeños huecos que ha dejado la combustión de las perlas de plástico (galería 6, foto 6.32). Esta estructura es sumamente frágil y puede representar una sensible pérdida de resistencia mecánica del producto atacado por fuego.

En ninguna de las probetas en cuestión hay goteo de cuerpos incandescentes sobre el papel de base, sino una caída apenas observable de cenizas sobre el papel de base.

Tampoco hay producción de humos ni olores apreciables con los sentidos.

Los promedios de áreas en cm^2 dañadas por clave de mezcla son los siguientes:



Gráfica 6.3.2 Comparación de las superficies promedio afectadas por el fuego por serie ensayada

Tabla 6.3.24 Área promedio dañada por el fuego en cm^2 por serie ensayada

EPS	55	64	65	66
Tipo III	E100+A 500+MG 35,1	E100+A 300+MG 14,4	E100+A 200+MG 8,1	E100+A 120+MF 6,4
12,6 cm^2	10,33 cm^2	9,33 cm^2	8,8 cm^2	5,8 cm^2

Como se observa en el gráfica 6.3.2, la probeta con superficie más afectada es la espuma virgen, lo cual es explicable por las mismas características del plástico celular. La mezcla con menor superficie afectada es la 66 con un promedio de $5,9 \text{ cm}^2$ que representa un 46% de la superficie de la espuma virgen y con 45 s más de exposición a la llama.

Se han ensayado las reacciones a un fuego pequeño las muestras de espuma virgen y de residuos molidos de espuma conglomerados, donde todos ellos han resultado afectados por el fuego aunque con reacciones distintas, las que se pueden atribuir principalmente a las diferentes relaciones de plástico celular y del conglomerante; a mayor presencia de sulfato cálcico en la mezcla mejor reacción de la probeta al ataque de fuego.

6.3.6.4 Conclusiones del ensayo de reacción al fuego

- Se ha ensayado con éxito dos tipos de materiales similares. El primero de uso común como panel de espuma de EPS para aislamiento térmico en la construcción y el segundo un grupo de materiales similares al primero y compuestos por muestras de fabricación propia, con cuatro variaciones de paneles fabricados con mezclas ricas en residuos de espuma de EPS y conglomeradas con escayola. Se proponen usos similares en la construcción para todos los anteriores.
- El ensayo ha confirmado las conductas de reacción al fuego de los paneles de espuma de EPS que se determinaron en la investigación preliminar de la tesis y que señalan la importancia de atender ese aspecto desde el diseño mismo de los nuevos materiales de construcción.

- El ensayo ha señalado conductas positivas de reacción al fuego de los paneles fabricados con residuos de espuma de EPS y conglomerante en las proporciones y condiciones que se manejan aquí.

Las comparaciones de las conductas a observar en el ensayo entre las paneles vírgenes y los de fabricación propia señalan que se dan diferencias sustanciales de reacción al fuego:

- Mientras el material celular homogéneo ante la presencia de llama corresponde con la naturaleza de la fase sólida de la que está hecho y se inflama, el material fabricado con residuos acondicionados de espuma de EPS conglomerados con escayola no sostiene la llama y se consume, sin producir ni favorecer la llama constante ni humos evidentes.
- La combustión en el material homogéneo provoca el colapso de la estructura y con ello la densificación o degradación del material. En las mezclas heterogéneas la combustión deja en las zonas cercanas al ataque de la llama, una frágil estructura de escayola carbonizada con grandes poros que son los que han dejado las partículas de poliestireno expandido que se han consumido.
- Las conductas mencionadas de reacción al fuego en los materiales heterogéneos se pueden atribuir a la presencia del conglomerante que aunado a las características propias de reacción al fuego, se ha producido con una estructura porosa que resulta de un amasado rico en agua. El conglomerante al envolver a la partícula de plástico espuma y dependiendo de la cantidad presente del mismo, impide o no favorece la transmisión de la llama entre los residuos de espuma.

Según las normas españolas el EPS estándar se califica M4 (Inflamabilidad alta) y el EPS resistente al fuego se califica como M1 (No inflamable). Estas clasificaciones dejarán lugar a las Euroclases. Las nuevas clasificaciones de reacción al fuego de materiales de construcción o Euroclases son siete (A1, A2, B, C, D, E y F) con dos clasificaciones adicionales, una de desprendimiento de humos y otra de caída de gotas o partículas.

Como se señala en la investigación preliminar no es posible determinar la clase a la que pertenece un material si no es a través de ensayos de laboratorio especializados, sin embargo la literatura ofrece rangos de clasificación probables para materiales aislantes y que son de interés para este ensayo:

- El EPS autoextinguible (EPS-SE) pasa la prueba del pequeño quemador (EN ISO 11925-2) en todos los espesores y densidades por lo tanto cumple con todos los requisitos de la Euroclase E. El EPS estándar o grado N sin aditivos retardantes de fuego se clasifica como Euroclase F o Euroclase sin determinar su reacción al fuego.
- La obtención de Euroclases más altas para el material se relaciona con su espesor, densidad y montaje que representan en conjunto la condición final de uso del plástico celular. Así, dependiendo de las características del producto en el que participe la espuma se pueden obtener Euroclases E, D, C o B, como es el caso de un panel sándwich de lámina metálica que puede obtener una Euroclase B.
- En base a las experiencias recabadas y la literatura revisada [APME92] [TEPP03], los materiales ensayados se pueden proponer con una clasificación como la que se muestra en la tabla 6.3.25.
- La clasificación de los dos primeros materiales surge de las propuestas de varios autores. Para el tercer material (plancha de residuos de espuma de EPS conglomerados con yeso o escayola) se propone como - **C, s1, d0** - debido a que durante el ensayo y de forma general, los materiales no produjeron combustión con llama, ni gotas inflamadas y la cantidad de humo desprendida fue inapreciable y con un olor a plástico difícilmente reconocible.

Tabla 6.3.25 Propuesta de clasificación de los materiales ensayados

Material	Propuesta de Clasificación en Euroclases
EPS-N Panel de EPS estándar virgen o grado N	F (Sin clasificar, sin comportamientos determinados)
EPS-SE Panel de EPS virgen autoextinguible	E (Combustible con contribución baja al fuego)
Panel de residuos de EPS conglomerados con yeso o escayola	C, s1, d0 (Combustible con contribución limitada al fuego. Baja cantidad de emisión de humos. No se producen gotas inflamadas)

6.4 CONCLUSIONES GENERALES DEL CAPÍTULO 6

Los ensayos practicados han aportado información acerca de los comportamientos de dos grupos de materiales, lo que ha permitido acercarnos a establecer tanto las ventajas como las limitaciones de las placas y paneles que contienen residuos molidos de EPS y que aquí se estudian.

Las informaciones obtenidas apuntan a las buenas posibilidades de uso de las nuevas placas y paneles en la construcción, pero que sin embargo, han evidenciado también sus desventajas en algunas de las mezclas con residuos que han de ser consideradas durante su uso.

Se ha de comenzar señalando como una ventaja que las placas de yeso y paneles de escayola desarrollados en esta tesis están fabricados con residuos de espuma de EPS acondicionados mediante un proceso industrial simple de molienda. Por su parte, los conglomerantes usados yeso y escayola son materiales abundantes; para su obtención en canteras a cielo abierto no requieren de procesos de alto impacto al ambiente o de alto consumo de energía, comparados con otros conglomerantes hidráulicos para la construcción donde por ejemplo para la obtención de cemento se requieren de 2 400 kW/h por tonelada mientras que para la fabricación de yeso se requieren de 1 200 kW/h por tonelada (equivalente a 35 kg de fuel) [VILLA01]. También se debe resaltar que para la fabricación de las probetas tampoco se han usado aditivos o refuerzos que impliquen un notable impacto al medio, sólo se ha empleado durante la fabricación almidón nativo, papel blanco y cartón de reciclado.

Se han ensayado los materiales de interés a través de su uso en dos aplicaciones como placa y como panel. De los resultados de las pruebas; se obtienen las siguientes conclusiones generales:

6.4.1 CONCLUSIONES DE LAS PLACAS DE YESO O ESCAYOLA CON RESIDUOS DE EPS

A lo largo de los ensayos se han establecido comparaciones de los comportamientos entre muestras de placas de yeso estándar, placas fabricadas de yeso o escayola sin residuos y de placas fabricadas con residuos de espuma conglomeradas con yeso o escayola. Como se observa en la tabla 6.4.1 varios de los experimentos las comparaciones indican un mejor

desempeño de las placas comerciales o de las placas de fabricación propia sin residuos de espuma (también llamadas de *Referencia* indicadas con la letra R) con relación a las placas que si contienen residuos molidos de EPS.

A continuación se exponen algunas conclusiones puntuales para cada prueba:

6.4.1.1 Conclusiones del ensayo de absorción de agua por inmersión de placas (6.2.1):

- Se han probado 30 probetas de materiales con diferentes comportamientos a la propiedad estudiada, donde todas las muestras analizadas absorben agua líquida en diferentes cantidades y que confirman la presencia de estructuras porosas en los núcleos fraguados de ellas.
- De entre las probetas ensayadas la mezcla que más baja absorción reportó fue la serie de referencia R(49) de probetas fabricadas sólo con yeso y que contiene una cantidad de agua de moderada (80% en peso).
- Las probetas que sí contienen residuos de EPS, en general mostraron las mayores proporciones de absorción de agua de toda la prueba (56,1% a 85,2%). De entre esos grupos de probetas, la mezcla de menor absorción fue la serie 49 con una cantidad moderada de residuos (MG 1,6%) y agua de amasado (80%) que reportó una media de 56,1%, cantidad muy cercana a la absorción media de la placa comercial 54,7%.
- Los resultados observados en el ensayo confirman la relación que hay entre la absorción de agua y las cantidades de agua y residuos empleadas para la fabricación de las probetas. Donde es más alta la absorción, es en los materiales formulados con proporciones ricas de agua de amasado y de residuos de EPS (serie 44 y 45).
- La cantidades de absorción de agua mostrada por las probetas comerciales en el ensayo (54,7%), pueden indicar que las mezclas de yeso empleadas por los fabricantes no contienen proporciones de agua elevadas o de más del 80% en peso por lo que su porosidad tampoco es elevada. Los resultados al respecto de la placa estándar también pueden indicar la presencia en su fórmula de aditivos o agregados como cal o vermiculita que disminuyen la absorción de agua en esos productos al obturar parcialmente su estructura porosa. La menor absorción de la placa estándar también se puede atribuir al uso de papeles y cartones con tratamientos con resinas naturales o sintéticas [PLANS04].
- El ensayo evidenció que la cantidad de agua empleada en la fabricación de las probetas tiene una relación directa con la cantidad de agua líquida que absorben las mezclas una vez fraguadas. Una mayor proporción de agua de amasado empleada, implica que el líquido al migrar de la estructura o evaporarse durante el fraguado deja más huecos o poros que tienden a ser llenados con agua durante la inmersión en el ensayo de absorción [VILLAN01].
- El ensayo confirmó que la mayor presencia de residuos de espuma en las mezclas analizadas tiene una relación con el aumento en sus porcentajes de absorción de agua de la mezcla que se trate, comparadas contra las mismas fórmulas pero que no contienen residuos (probetas de referencia R). De las pruebas de inmersión obtenemos algunos ejemplos donde que la absorción de agua en peso para la mezcla 49 tuvo una media 56,1% mientras su material de referencia sin residuos fue de 44,7%, la mezcla 44 fue de 83,9% y su material de referencia reportó una absorción de 67,5% (Tabla 6.4.1).
- Las pruebas de absorción de agua del EPS (tipo III 15kg/m³) indican que la absorción de la espuma virgen empleada para los ensayos es baja (2,9%) por lo que el aumento

en la absorción de agua del material compuesto no parece atribuirse a las características del plástico celular, sino principalmente, a la inclusión del residuo en la masa de yeso y a una pobre unión con el conglomerante, que favorece la formación de más poros alrededor de las perlas de plástico que tienden a ser llenados de agua durante la inmersión. Esta idea se refuerza al observar que la pérdida de agua en las probetas a las 24 hrs después de la inmersión (tabla 6.2.3) se da a mayor velocidad en las mezclas que contienen residuos de EPS.

- El ensayo mostró también que los recubrimientos de cartón reciclado y papel empleados para la fabricación de las probetas participan activamente en los porcentajes de absorción del producto y evidenció la importancia de su selección y forma de aplicación en la producción de placas para la construcción. Existen en el mercado placas de yeso resistentes al agua con tratamientos hidrófugos donde se incorpora aceite siliconado tanto en la celulosa superficial como en su núcleo de yeso [PLADUR03] [KNAUF04].
- Por otro lado se ha mostrado que, si bien las mezclas que contienen espumas absorben proporciones más altas de agua, también pierden el líquido de forma más rápida hasta retornar a masas iguales o un poco menores a su peso seco original. Esto parece indicar que la absorción de agua de las probetas se debe primordialmente a un fenómeno de absorción de agua por capilaridad ya que un cuerpo fraguado de yeso forma una compleja estructura ramificada y con poros comunicados entre sí lo que hace que el cuerpo fraguado de yeso absorba y ceda humedad al ambiente [GARATE99].

Tabla 6.4.1 Resultados generales de los ensayos para el uso de materiales en una aplicación similar a una placa para la construcción

Mezcla	Fórmula (% en peso)	Absorción de agua (%)	Densidad laminar (kg/m ²)	Resistencia a la flexión (N)	Reacción al fuego (euroclases)	Resistencia al impacto (Ø mm)
Placa de yeso estándar	-	54,7	10	273	A2,s1,d0	17,3
42	YC100%+A 120% +EPS MG 2%	74,8	6,22	152,4	B,s2,d0	21,98
44	YC100%+A 120% +EPS MG 3%	83,9	5,57	175,4	B,s2,d0	23,11
45	E100%+A 120% +EPS MG 3%	85,2	5,55	189,4	B,s2,d0	22,14
49	YR100%+A 80% +EPS MG 1,6%	56,1	7,69	234	B,s2,d0	22,29
R (42-44)	YC100%+A 120%	67,5	8,24	244	A2,s1,d0	17,65
R (45)	E100%+A 120%	74	8,83	271	A2,s1,d0	14,76
R (49)	YR100%+A 80%	44,7	10,83	407	A2,s1,d0	14,08

6.4.1.2 Conclusiones del ensayo de densidad laminar de placas

El *ensayo de la densidad laminar* (6.2.2) permitió comparar las masas de materiales comerciales y aquellas de los materiales propuestos que se investigan:

- El ensayo confirmó que a mayor proporción de agua de amasado y mayor proporción de residuos de espuma en la mezcla, corresponde con una disminución de la densidad mezcla que se trate.
- Los materiales de referencia (R) ofrecieron densidades casi siempre menores que los producidos con materiales comerciales, en el caso de estas probetas la pérdida se da al formular las mezclas (R) con una relación mayor de agua y que produce un estructura más porosa en el yeso. Esta idea se refuerza al observar que en la única mezcla más pesada que el material comercial fue la (R49), que contiene una proporción de agua del 80% en peso mientras que las otras probetas de referencia contienen agua al 120% en peso.
- Lo anterior puede indicar también que las placas comerciales se fabrican con proporciones de agua intermedias, en relación a aquellas que se han empleado en el ensayo (80% y 120% en peso) o bien que contiene algún tipo de agregado aligerante como la perlita.
- De acuerdo con los resultados en el ensayo se obtuvieron notables diferencias entre los materiales ensayados. Los materiales que contienen residuos de espuma siempre ofrecieron mejores valores de densidad:
 - a. Un 37% menos con relación a los materiales de referencia (R)
 - b. Un equivalente al 45% menos que las probetas de placa comercial

6.4.1.3 Conclusiones del ensayo de flexión de placas

El *ensayo de flexión* (6.2.3) de los materiales en aplicaciones de tipo placa permite ofrecer las siguientes conclusiones:

Por su forma de fabricación de laminado continuo, las placas comerciales muestran diferentes respuestas a esfuerzos según el sentido como éstos se apliquen, lo que lleva a que las placas muestran mayores resistencias si los esfuerzos se aplican en el sentido longitudinal que en el sentido transversal de la placa. Acorde al comportamiento descrito de las placas laminadas la Norma UNE 120 023 [1998] fija dos valores mínimos a cumplir según el espesor de la placa ensayada y si la placa se ha cortado de la muestra de manera paralela o transversal a la forma de fabricación. Este hecho no se aprecia en las probetas de fabricación propia dado éstas no fueron fabricadas por laminado sino por vaciado en molde.

Para los análisis del ensayo se han usado los valores de resistencia transversal de la placa de yeso estándar expresados en la Norma correspondiente UNE 120 023 [1998] y se observan los siguientes resultados:

- Los ensayos señalan la estrecha relación que hay entre las pérdidas de resistencias a la flexión obtenidas y la proporción de agua y de residuos de espuma presentes en las mezclas estudiadas. Las mezclas con 120% de agua conglomeradas con YC100% y residuos de espuma al 2% y 3% en peso, fueron las series (42 y 44) con menor resistencia reportadas (152 N y 175 N respectivamente).
- El ensayo ha indicado que las probetas de placa comercial (273 N) y todas las probetas de referencia (R) sin espumas (244-407 N) superan y aprueban los valores mínimos

exigidos en la norma (210 N). Entre las probetas de **placa** con residuos de EPS sólo la probeta 49 (234 N) logró superar el valor mínimo aceptado.

- El ensayo evidenció a través de su forma de fractura, la homogeneidad o la heterogeneidad de los materiales de las probetas ensayadas:
 - a. En las probetas comerciales y las de referencia, el rompimiento corresponde a un material semi-quebradizo con poca ramificación de su fractura.
 - b. En las probetas que contienen residuos de espuma, el esfuerzo último se observa como un rompimiento más dúctil y con una mayor ramificación de la fractura promovida por los cuerpos de espuma.
- El ensayo evidenció la importancia de una sólida unión entre el núcleo de la placa y el recubrimiento de cartón. Este parece ser uno de los factores para el rendimiento de las probetas placa comercial durante este ensayo y mostró una área a atender a futuro en las aplicaciones que se proponen.

6.4.1.4 Conclusiones del ensayo de reacción al fuego de placas

Del *ensayo de reacción al fuego* (6.2.4) de los materiales en aplicación en placas se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El ensayo ha permitido constatar las buenas conductas de reacción al fuego de los conglomerantes y de las placas de yeso ensayados.
- También ha evidenciado que las buenas conductas descritas arriba se conservan en las mezclas que contienen residuos de espuma de EPS, en las cantidades y condiciones en las que se ensayaron. Las probetas de placa con residuos y sin papel se clasificaría según las Euroclases como A2, es decir, como un material seguro contra el fuego.
- Se ha observado la importancia para los resultados del ensayo de la selección del tipo y acondicionamiento del cartón usado como recubrimiento de la placa.
- Se ha evidenciado que los materiales propuestos se consumen si son sometidos a una llama constante pero no la sostienen ni la promueven, ni producen humo ni depositan gotas incendiadas.

6.4.1.5 Conclusiones del ensayo de resistencia la impacto de placas

Del *ensayo de resistencia al impacto* (6.2.5) se extraen las siguientes conclusiones:

- De los materiales ensayados, las probetas obtenidas de placa comercial y aquellos que no contienen residuos de espuma en su fórmula ambos cumplen con la Norma correspondiente a las placas de yeso estándar (una huella no mayor a 20 mm Ø). Las probetas que contienen residuos muestran huellas de impacto entre 21,98 mm y 23,99 mm que exceden entre el 9,9% y el 19,95% el límite marcado por la Norma UNE 102 035 [2001]; aunque esta diferencia en mínima en milímetros, indica la importancia de las modificaciones en la estructura del núcleo por la presencia de residuos de espuma.
- Se hace evidente la importancia de una fuerte unión entre el envoltorio y el núcleo de la placa para obtener mejores resultados de resistencia al impacto. En las probetas con la mejor unión se observó una menor huella producida por la bola de acero, que en probetas donde la unión no se mostró tan sólida.

- Las formas irregulares de algunas huellas y sus distintas dimensiones, han señalado hacia la heterogeneidad de las mezclas con las que están fabricadas las probetas de placa con residuos y de la importancia de obtener mezclas más homogéneas para un mejor resultado en las aplicaciones de las mezclas.
- La comparación de distintas formas de huellas y de las formas de grietas producidas en los diferentes tipos de probetas confirman que las altas proporciones de agua en la preparación de los conglomerantes y la presencia de residuos en las mezclas, llevan a un debilitamiento al impacto de los cuerpos fraguados. La probeta 44 que contiene residuos de EPS y está fabricada con una relación de agua de amasado del 120% reporta una media de huella de 23,11 mm de \emptyset mientras que la probeta R(44) sin residuos, reporta una media mucho menor con 17,65 mm \emptyset . La serie 49 con residuos y fabricada con una proporción de agua del 80% tiene una huella con media de 22,29 mm de \emptyset y la probeta R49 sin residuos tiene una huella de 14,08 mm de \emptyset . Esto significa que una probeta con alta participación de agua y residuos es menos resistente al impacto que una probeta que también contiene residuos de EPS pero con menor proporción de agua de amasado.

6.4.1.6 Conclusiones del conjunto de ensayos realizados a las placas

El *conjunto de ensayos* efectuados a los materiales en su aplicación como **placa**, permiten confirmar que son utilizables en las maneras indicadas. De los resultados también se extraen las siguientes conclusiones:

- Los materiales y su aplicación como placa como se ensayaron se pueden usar en la construcción, con usos similares pero de menor exigencia que aquellos que cumple la placa de yeso estándar.

De los ensayos (ver tabla 6.4.1) obtenemos como ejemplo: que una placa estándar tiene una resistencia a la flexión de 273 N mientras la placa que contiene residuos más cercana (mezcla 49) reporta una resistencia de 234 N, esto es un 14% menos de la placa comercial. De la misma manera la placa estándar tiene una absorción de agua en peso del 54,7% y la placa más cercana en esa propiedad es la 49 con 56,1% de media, por lo cual esta última es 2% más absorbente. Para una placa estándar se propone una clasificación de comportamiento al fuego en Euroclases de (A2, s1, d0) y para una probeta con residuos de EPS (49) se propone una clasificación algo mayor (B, s2, d0) por lo cual tiene una reacción al fuego también menor.

Los resultados de los ensayos entre la placa estándar y la placa con residuos (49) son favorables a las conductas de la placa estándar sin embargo son cercanos a los reportados para la placa 49 que es además 30% más ligera que la placa comercial.

- Los usos que son los más adecuados para las placas con residuos son las de revestimiento de zonas de recorrido y estancia en el interior de las construcciones, guardadas de los efectos de la lluvia y humedad.
- Las aplicaciones verticales sobre muros planos de las placas con residuos de EPS se señalan como las ideales para los materiales propuestos. Esto permitiría un apoyo plano para la placa y que cooperaría a evitar posibles deformaciones.
- Las placas con residuos de espuma también pueden ser aplicadas en los espesores que se han ensayado para la fabricación de particiones sin el apoyo de una pared, aunque para ello (como las placas comerciales) se tendría que agrupar varias placas para engrosar y lograr el tabique. También habría que considerar las limitaciones de resistencia a la flexión y al impacto que han mostrado los materiales y las aplicaciones

durante los ensayos. Estas formas de aplicación no se han explorado en esta investigación.

- De la fabricación y manipulación de las placas a ensayar y de los ensayos mismos, se indica que el maquinado de los nuevos materiales es más fácil que el de las placas comerciales, lo que es siempre de interés para los instaladores de estos materiales en las obras de construcción.
- También los resultados de los ensayos permiten señalar oportunidades de aplicación para los materiales propuestos en usos de menor exigencia que la edificación tradicional, como son las de la edificación temporal y el escaparatismo. En los últimos usos probablemente habría que reforzar los elementos constructivos debido a sus limitaciones de resistencia.
- De igual forma que en las placas de yeso convencional, los materiales propuestos permitirían dárseles acabados como pintura o papel decorado.
- En base a los resultados de los ensayos y a las experiencias obtenidas durante el proceso de investigación, consideramos que mezclas con características cercanas a las que se describen a continuación, pueden ser aplicadas con éxito en la fabricación de un elemento constructivo ligero de usos similares a la placa de yeso estándar (tabla 6.4.2).

Tabla 6.4.2 Materiales seleccionados con las mejores características para la aplicación como placa

No. de mezcla	Fórmula	Absorción agua %	Densidad laminar (kg/m ²)	Resist. a la flexión (N)	Reacción al fuego (Euroclases)	Resistencia al impacto (Ø mm)
49	Yeso rápido 100+ agua 80 + EPS MG 1,6	56,1	7,69	234	B, s2, d0	22,29
45	Escayola 100+ agua 120+ EPS MG 3	85,2%	5,55	189,4	B, s2, d0	22,14

- De entre las dos mezclas seleccionadas 49 y 45 para aplicar como placa con residuos de EPS, la mezcla 49 ofrece mayor resistencia a la flexión (234 N), una densidad menor en 23% de la placa comercial y una absorción de agua del 56,1% similar al 54,7% reportado para la placa laminada. Aunque la mezcla 45, es más ligera que la mezcla 49 y reporte una mayor resistencia al impacto, la gran cantidad de agua que absorbe (85,2%) es un problema a atender y que sitúa a esta placa en desventaja con la mezcla de yeso rápido 49. Tabla 6.4.2.

6.4.2 CONCLUSIONES DE LOS PANELES CON RESIDUOS DE EPS CONGLOMERADOS CON ESCAYOLA

Durante los ensayos que se describen a continuación se han establecido comparaciones de comportamientos, entre muestras de espuma virgen de EPS y de paneles similares fabricados con residuos molidos de espumas de EPS conglomerados con yeso o escayola.

En varios de los ensayos practicados los resultados indican un mejor desempeño de las probetas de espuma virgen sobre las de mezclas de residuos y conglomerante. Tabla 6.4.3.

6.4.2.1 Conclusiones del ensayo de absorción de agua de paneles

Del ensayo de absorción de agua por inmersión total (6.3.1) se obtienen las siguientes conclusiones:

- Todos los materiales ensayados muestran diferentes cantidades de absorción de agua después de una inmersión total durante un periodo prolongado.
- Los paneles de espuma de EPS virgen aprueban los máximos de absorción de agua admitidos para la prueba (3% como máximo) y que están señalados en la norma correspondiente UNE EN 13 163 [2002].
- El ensayo confirmó la importancia de la presencia de agua y humedad en el conglomerante para la conservación de sus propiedades y que se reflejan en las propiedades de los paneles de residuos.
- Los ensayos confirmaron la tendencia de la escayola a disolverse en agua. Este hecho afectó especialmente a las mezclas con las densidades más bajas de todas las series de probetas: 55 (64 kg/m³) y 64 (104 kg/m³) por lo que fueron eliminadas de la prueba, no obstante que la inmersión total en agua es una condición extraña y extrema en la construcción.

Tabla 6.4.3 Resultados generales de los ensayos para el uso de materiales en una aplicación similar a un panel aislante térmico de EPS para la construcción.

Mezcla	Fórmula (% en peso)	Absorción de agua (%)	Compresión (kPa)	Cond. Térmica (W/mK)	Densidad Aparente (kg/m ³)	Flexión (kPa)	Reacción al fuego (euroclases)
EPS virgen	Tipo III comercial	2,9	63,97	0,039	15	124,6	F
55	E100%+A500%+ EPS MG 35,1%	-	-	-	64	31,4	C,s1,d0
64	E100%+A300%+ EPS MG 14,4%	-	48,2	-	104	180,2	C,s1,d0
65	E100%+A200%+ EPS MG 8,1%	20,7	79,7	0,065	193	349,9	C,s1,d0
66	E100%+A120%+ EPS MG 6,4%	24,1	86,5	-	280	154,4	C,s1,d0

6.4.2.2 Conclusiones del ensayo de compresión de paneles

De los ensayos de compresión (6.3.2) podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Se demostró que las espumas vírgenes cumplen con los esfuerzos de compresión mínimos (65 kPa) que señala la norma que corresponde a la espuma de EPS usada en el ensayo.
- El ensayo señaló que de los **paneles** de residuos conglomerados, dos de ellos (mezcla 65 y 66) cumplen ampliamente con los mínimos de esfuerzo a la compresión que marca la norma para espuma virgen. La mezcla 55 hubo de anularse debido a la

fragilidad del material provocado por el alto contenido de agua (500%) y de residuos usados para su fabricación (35,1%).

6.4.2.3 Conclusiones del ensayo de conductividad térmica de paneles

Los *ensayos de conductividad térmica* (6.3.3) ofrecen las siguientes conclusiones:

- Las espumas de EPS son materiales de aislamiento apreciados por su baja conductividad térmica tanto en el campo de la construcción como en otros como el del envase y embalaje de alimentos.
- Se parte de que disminuir valores de conductividad tan bajos como los que muestra el EPS no es factible de las maneras que se practican en esta investigación y los resultados de los ensayos han confirmado este hecho. Así que lo que se pretende es acercarse lo más posible a esas mediciones por medio de usar materiales plásticos similares conglomerados con yeso o escayola, esto se ha conseguido.
- Los resultados de la prueba de conductividad indican que los datos obtenidos para probetas con residuos de espuma conglomerados (0,063 – 0,067 W/mK) oscilan entre de 1,4 a 2,1 veces la conductividad declarada por el fabricante para espumas de EPS de baja y media densidad (0,033 y 0,046 W/mK). Este valor aunque comparativamente alto puede resultar atractivo para aplicaciones de aislamiento menos rigurosas que aquellas donde se aplica la espuma virgen.

6.4.2.4 Conclusiones del ensayo de densidad aparente de paneles

Los *ensayos de densidad aparente* (6.3.4) produjeron información que permite las siguientes conclusiones:

- Los ensayos confirmaron que dadas la propiedad de una muy baja densidad de la espuma de EPS, resulta imposible disminuirla con la aportación de otros materiales de mayor densidad al residuo. Así el objetivo en esta investigación ha sido acercarse lo más posible a la densidad aparente de la espuma virgen y satisfacer al mismo tiempo las necesidades prácticas de las obras de construcción.
- El ensayo ha mostrado que todas las probetas ensayadas que se consideraron viables de ser usadas en la construcción reportan densidades notoriamente mayores a las de las espumas vírgenes (15 kg/m^3); esas proporciones empiezan con el equivalente a 4 veces más la densidad del EPS de referencia.

6.4.2.5 Conclusiones del ensayo de flexión de paneles

De los *ensayos de flexión* (6.3.5) se pueden obtener lo siguiente:

- El ensayo indicó que las probetas de espuma virgen ofrecen lecturas homogéneas y cumplen con los mínimos que señala la norma que le corresponde.
- Los datos generados por los materiales con residuos de espuma durante el ensayo de flexión resultaron con mucha mayor dispersión (entre 31,4 y 349,9 kPa) que los de la espuma virgen y que se debe a la heterogeneidad de los materiales compuestos y a su proceso de fabricación manual.

- De los ensayos se obtiene que con la excepción de la mezcla 55 (31,4 kPa), todas las mezclas de panel de escayola cumplen con el mínimo de resistencia a la flexión del EPS (50 kPa) exigido por la Norma EN UNE 13163 [2002] para la espuma virgen y que marca como mínimo a cumplir con el objetivo de asegurar la manipulación del material.
- Los materiales que contienen residuos mostraron guardar una relación directa entre densidad y fragilidad, de esta manera entre los materiales ensayados con mayor densidad comparada con la espuma virgen la mezcla 65 (193 kg/m³) fue el valor más alto de resistencia a la flexión (349 kPa). Mientras la serie de probetas 55 las de menor densidad entre los materiales con residuos (64 kg/m³) tuvo también la menor fuerza última a la flexión (31,4 kPa).
- Por otro lado los paneles de escayola que obtuvieron los valores mayores de rotura muestran también los menores desplazamientos durante el ensayo, donde la serie de la mezcla 65 tiene un desplazamiento medio de 24,4 mm y 349,9 kPa; en contraste con el panel de EPS virgen donde la resistencia última reportada en el ensayo fue de 124,6 kPa con un desplazamiento de 32,9 mm.
- Los resultados de la prueba permiten señalar que la fragilidad de algunos de los materiales con residuos obedece principalmente a:
 - a. Las características de la fórmula del conglomerante
 - b. La cantidad de conglomerante presente en el material
 - c. Las pobre adhesión que se da entre el conglomerante y la espuma de plástico
- Para obtener un mejor aprovechamiento de las cualidades del material propuesto para la aplicación se requiere de un refuerzo, el cual puede ser una envoltura de cartón o papel además de una unión firme entre la envoltura y el núcleo.

6.4.2.6 Conclusiones del ensayo de reacción al fuego de paneles

El *ensayo de reacción al fuego* (6.3.6) de los paneles permite las siguientes conclusiones:

- A través del ensayo se confirmaron las conductas conocidas de reacción al fuego de la espuma virgen y que condicionan su aplicación como un elemento constructivo que requiere de instalarse protegido con otro material como un laminado de cerámica o chapa de metal entre otros.
- Se han evidenciado también las reacciones positivas de reacción ante un ataque de llama de los materiales de residuos de EPS conglomerados; esto en comparación con las conductas mostradas por las probetas de espuma virgen.
- El ensayo indica que los materiales propuestos se consumen si son sometidos a una llama constante pero no la sostienen ni la promueven, ni producen humo ni depositan gotas incendiadas.

6.4.2.7 Conclusiones del conjunto de ensayos aplicados en paneles

El *conjunto de ensayos* efectuados permiten establecer que los paneles de residuos de espuma de EPS conglomerado con escayola, son utilizables como materiales de construcción con la siguientes aplicaciones:

- Las aplicaciones verticales adosadas a muros planos se señalan como las más indicadas para este material. Esto le da el soporte mecánico necesario para sustituir guarnecidos a los que puede dar acabado con un enlucido fino.
- A diferencia de las espumas de EPS, los materiales conglomerados que se ensayaron sí se pueden aplicar dentro de los recintos sin una barrera de protección al fuego directo. Esta aplicación se desprende de sus conductas observadas en los ensayos de reacción al fuego con el ataque puntual de una llama donde no produjeron ignición ni combustión, ni se produjo ningún tipo de goteo, ni humos visibles. En caso de ataque los cuerpos de EPS que se incendian no pueden propagar la llama ya que están envueltas en yeso. Después del ataque de llama, las zonas dañadas se muestran como frágiles estructuras porosas calcinadas donde la evaporación del plástico deja pequeños huecos con aire en el núcleo de yeso, por lo cual durante un tiempo se mantiene la protección del panel ante el ataque de llama.
- Las propiedades de reacción al fuego de los paneles conglomerados que se mostraron en el ensayo y que se describen en el punto anterior, señalan la posibilidad de su aplicación como revestimientos de paredes interiores sin enlucido o con un enlucido muy delgado en zonas de recorrido y estancia con bajos riesgos de incendios.
- Los ensayos de los paneles de residuos aglomerados también sugieren su posible aplicación horizontal en la construcción como cielos rasos o bases protegidas para la construcción de suelos; habría que considerar sus limitaciones en comportamientos mecánicos y reforzarlos mecánicamente o formularlos con aditivos de interés según la aplicación deseada.
- De los resultados de los ensayos se puede determinar que los paneles de residuos de EPS conglomerados como los que se han ensayado aquí se pueden usar también como elementos de aislamiento térmico colocados en los huecos entre muros, de forma similar al uso que se le da al EPS y a la espuma de PU. Esta forma de uso si se da en zonas de alta humedad, las placas de residuos conglomerados pueden requerir de un tratamiento de impermeabilización debido a la condensación de agua sobre las mismas.
- Por sus características los paneles ensayados también se pueden aplicar con éxito:
 - a. Sustituyendo a la espuma virgen en la formación productos transformados con placa de yeso estándar o la placa que se propone en esta tesis o con otros materiales de construcción.
 - b. También los ensayos y la manipulación de los paneles permiten señalar oportunidades de aplicación en usos de menor exigencia que los de la edificación tradicional como son las de edificación temporal y escaparatismo en aplicaciones combinadas con materiales de revestimiento y decoración como chapas de melamina o de otro plástico
- En base a los resultados de los ensayos y a las experiencias obtenidas durante el proceso de investigación se considera que mezclas de residuos de EPS y escayola como las que se describen en la tabla 6.4.4 pueden ser aplicadas con éxito en la fabricación de elementos constructivos con usos similares a los de un panel de EPS.

Tabla 6.4.4 Mezcla con las mejores características para la aplicación de panel de aislamiento térmico similar parcialmente a la espuma virgen de EPS

No. de mezcla	Fórmula	Absorción de agua %	Densidad (kg/m ³)	Resist. a la flexión (kPa)	Cond. térmica (W/mK)	al fuego Euroclase	Resist. Comp. (kPa)
65	Escayola 100% + agua 200% + EPS MG 8,1%	20,7	193	349,9	0,065	C, s1, d0	79,7

Normas utilizadas en los ensayos

6

En el ensayo de Absorción de Agua por inmersión total de placas (6.2.1):

UNE 102035/1M:2001 *Placa de yeso laminado. Métodos de ensayo*. Apartado 12. Capacidad de absorción de agua. Determinación de absorción total de agua.

UNE 102023:1998. *Placas de yeso laminado. Condiciones generales y especificaciones*.

En el ensayo de la Densidad Aparente de placas (6.2.2):

UNE 102035/1M:2001. *Placas de yeso laminado. Métodos de ensayo*. Apartado 8. Determinación de la masa por unidad de superficie.

En el ensayo de Flexión de placas (6.2.3):

UNE 102035/1M:2001 *Placas de yeso laminado. Métodos de ensayo*. Punto 9. Resistencia mecánica a la flexión. Apartado 9.3. Procedimiento.

UNE 102023:1998. *Placas de yeso laminado. Condiciones generales y especificaciones*.

En el ensayo de Reacción al Fuego de placas (6.2.4):

UNE EN 13501-1:2002 *Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación*. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.

UNE-EN ISO 11925-2:2002. *Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción*. Inflamabilidad de los productos de construcción cuando se someten a la acción directa de la llama. Parte 2: Ensayo con una fuente de llama única. (ISO 11925-2:2002).

UNE-EN 13823:2002. *Ensayos de reacción al fuego de productos de construcción*. Productos de construcción excluyendo revestimientos de suelos expuestos al ataque térmico provocado por un único objeto ardiendo.

UNE-EN ISO 1182:2002. *Ensayos de reacción al fuego para productos de construcción*. Ensayo de no combustibilidad. (ISO 1182:2002).

UNE-EN ISO 1716:2002. *Ensayos de reacción al fuego de los productos de construcción*. Determinación del calor de combustión. (ISO 1716:2002).

En el ensayo de Resistencia al Impacto de placas (6.2.5):

UNE 102035/1M:2001 *Placa de yeso laminado. Métodos de ensayo*. Apartado 10. Resistencia al impacto.

UNE 102023:1998. *Placas de yeso laminado. Condiciones generales y especificaciones*.

En el ensayo de Absorción de Agua por inmersión total de paneles (6.3.1):

ISO 2896:2001 *Rigid cellular plastics—Determination of water absorption*. International Organization for Standardization. Geneva Switzerland. 2001.

D 2842-01 *Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics*. PA. USA 2001.

UNE-EN 13163:2002. *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación*. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS). Especificación.

UNE-EN 12087:1997. *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación*. Determinación de la absorción de agua a largo plazo por inmersión.

En el ensayo de Compresión de paneles (6.3.2):

UNE 53205:2001. *Plásticos. Materiales plásticos celulares rígidos*. Resistencia a la compresión. Especificación.

UNE-EN 13163:2001. *Productos aislantes térmicos para las aplicaciones en la edificación*. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS). Especificaciones.

UNE-EN ISO 291:2004. *Plásticos. Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos*. (ISO/DIS 291:2004).

En el ensayo de Conductividad Térmica de paneles (6.3.3):

UNE EN 13163:2002. *Productos aislantes térmicos para aplicación en la edificación. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS)*. Especificación. AENOR, Madrid, febrero del 2002.

UNE-EN 12667:2002. *Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica*. AENOR, Madrid, julio del 2002.

En el ensayo de la Densidad Aparente de paneles(6.3.4):

UNE-EN 1602:1997. *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la densidad aparente*.

UNE-EN ISO 845:1996. *Plásticos y cauchos celulares*. Determinación de la densidad (volumétrica) aparente.(ISO 845:1988).

UNE-EN ISO 291:2004. *Plásticos. Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos*. (ISO/DIS 291:2004).

En el ensayo de Flexión de paneles (6.3.5):

UNE 53204-2:2001. *Materiales Plásticos. Materiales celulares rígidos. Parte 2: Determinación de las propiedades de flexión.* Parte 2. Métodos de ensayo para determinar la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en flexión aparente. AENOR. Madrid 2001.

UNE 53204-1:2001. *Materiales Plásticos. Materiales celulares rígidos. Parte 1: Ensayo de flexión.*

UNE-EN 13163:2001. *Productos aislantes térmicos para aplicación en la edificación. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS). Especificación.* AENOR. Madrid, febrero del 2002.

En el ensayo de Reacción al Fuego de paneles (6.3.6):

UNE 53127:2002. *Plásticos celulares. Determinación de las características de combustión de probetas en posición horizontal sometidas a una llama pequeña.* Madrid, 2002.

UNE-EN ISO 11925-2:2002. *Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción . Inflamabilidad de los productos de construcción cuando se someten a la acción directa de la llama. Parte 2: Ensayo con una fuente de llama única.* (ISO 11925-2:2002). Madrid, 2002.

Galería de fotos

6



Foto 6.9



Foto 6.10

Foto 6.9 Conjunto de **placas** de yeso y escayola con residuos preparadas para su ensayo

Foto 6.10 Probeta No. 1 de la serie 49 de placa, (300 x 400 x 12,5 mm)



Foto 6.11



Foto 6.12

Foto 6.11 Probeta de placa de yeso laminado comercial sometida a flexión

Foto 6.12 Probeta de placa 3, mezcla 45, resistencia a la flexión de 189,4 N



Foto 6.13



Foto 6.14

Foto 6.13 Rompimiento poco ramificado de una probeta de Placa Comercial-3

Foto 6.14 Probeta 45 de placa sin recubrimiento, ensayo de reacción al fuego

GALERÍA DE FOTOS

6

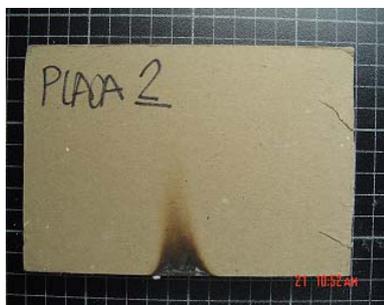


Foto 6.15



Foto 6.16

Foto 6.15 Zona dañada por el ataque de la llama por un borde en una placa comercial

Foto 6.16 Combustión moderada del recubrimiento de la probeta 45-3 de placa



Foto 6.17



Foto 6.18

Foto 6.17 Área dañada por el fuego en la probeta 42-3 de placa con recubrimiento de papel

Foto 6.18 Marca de la huella de impacto en el núcleo de una probeta de placa con EPS



Foto 6.19



Foto 6.20

Foto 6.19 Marca de la huella de impacto en el núcleo de una probeta de placa con EPS

Foto 6.20 Probeta 66-4 de panel sometida al ensayo de compresión

GALERÍA DE FOTOS

6



Foto 6.21



Foto 6.22

Foto 6.21 Probeta de EPS virgen tipo III sometida al ensayo de compresión

Foto 6.22 Probeta de la mezcla 65 dentro de la cavidad del molde durante su fraguado



Foto 6.23



Foto 6.24

Foto 6.23 Probeta número 65-1 recién extraída del molde al inicio del endurecimiento

Foto 6.24 Banco de pruebas para el ensayo de flexión de placas y paneles



Foto 6.25



Foto 6.26

Foto 6.25 Probeta de panel de EPS virgen tipo III, resistencia a la flexión de 124,6 kPa

Foto 6.26 Probeta de panel mezcla 65 sometida al ensayo de flexión

GALERÍA DE FOTOS

6



Foto 6.27

Foto 6.27 Probeta de la mezcla 66 de panel sometida al ensayo de flexión



Foto 6.28

Foto 6.28 Rompimiento de la probeta 65-3 de panel con una fractura regular, ensayo de flexión



Foto 6.29

Foto 6.29 Probeta de panel de EPS virgen tipo III sometidas al ataque de la llama



Foto 6.30

Foto 6.30 Probetas de panel de EPS virgen antes y después del ensayo de reacción al fuego



Foto 6.31

Foto 6.31 Probeta de panel 66-3 sometida al ataque de la llama durante 60 seg



Foto 6.32

Foto 6.32 Detalle de los huecos que ha dejado la combustión en la superficie de una probeta

7

CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS



7 CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS

Como se describe a lo largo de estas conclusiones, el trabajo de investigación desarrollado sobre la aplicación de residuos de espuma de EPS que proceden del flujo de residuos municipales y que han sido conglomerados con yeso y escayola, ha sido satisfactorio en la mayoría de sus etapas.

Las conclusiones se organizan atendiendo el orden de los objetivos planteados al inicio de la investigación y a la luz de las ventajas y desventajas observadas en los materiales propuestos a lo largo de su ensayo. Los objetivos con los que dio comienzo el proyecto se resumen de la siguiente manera:

El objetivo inicial de esta tesis es:

Investigar una forma de reciclaje de residuos de EPS que permita aprovechar las propiedades que aún mantiene la espuma al momento de ser dispuesta al flujo de residuos municipales.

La forma de reciclaje consiste en la formación de mezclas con varios componentes en diferentes proporciones y en diferentes circunstancias; por un lado de residuos de EPS acondicionados para la mezcla y por el otro, un conglomerante hidráulico de yeso o escayola. Las mezclas obtenidas se usarán en la construcción.

Otros objetivos de esta tesis son:

- Determinar la (s) mejor(es) fórmula (s) de (los) nuevo (s) material (es) para ser usados en la construcción para cada tipo de aplicación.
- Identificar las propiedades y características principales de (el o los) nuevo (s) material (es) propuestos para conocer sus ventajas y limitaciones.

7.1 CONCLUSIONES PRINCIPALES

Una vez establecidos los Objetivos más importantes de la Tesis ahora se describen las conclusiones principales de la investigación de tesis y que se exponen con mayor detalle a lo largo de este capítulo.

- a. La investigación de antecedentes y los trabajos experimentales desarrollados durante este trabajo de tesis permiten confirmar que la recuperación de EPS ofrece una oportunidad para cooperar a la mejora del medioambiente.
- b. Con la fabricación y ensayo de las placas y los paneles investigados se ha comprobado que es posible al aplicación de fórmulas específicas para el desarrollo de materiales compuestos que involucren el uso de residuos molidos de EPS mezclados con otros materiales y que son transformados en objetos útiles a través de tecnologías existentes.
- c. Las etapas experimentales de la tesis han sido fundamentales para el desarrollo de las propuestas de placas y paneles presentadas, ya que por medio de la actividad

experimental se ha obtenido información que permite establecer la posibilidad efectiva de la utilización en la construcción de residuos de EPS, conglomerados con un material conocido, abundante y económico como el yeso o la escayola.

- d. Las pruebas han confirmado que las placa de yeso aligerado con residuos de EPS (mezclas 49) y el panel de residuos de EPS conglomerados (mezcla 65) con escayola ensayados, muestran posibilidades para convertirse en elementos constructivos producibles.

7.2 CONCLUSIONES SOBRE COMPORTAMIENTOS INVESTIGADOS

El trabajo experimental desarrollado sobre las mezclas de residuos de EPS conglomerados y su uso en placas y paneles para la construcción produjo información acerca de las mezclas empleadas y de su uso en las aplicaciones propuestas:

- a. Que rechazaron un comportamiento esperado del material o de sus componentes, previsto al inicio de la investigación. Como por ejemplo: en base a la investigación preliminar, se esperaba obtener una unión aceptable del núcleo del yeso con sus envoltentes de cartón o papel sin haber introducido al conjunto dentro de un horno de secado. Al efectuar los experimentos y en base a los resultados obtenidos se determinó que es necesario elevar la temperatura de conjunto de yeso y envoltente para lograr una unión fuerte entre ellos. También ha influido la textura que provoca la gran cantidad de residuos de espuma de ESP (de 1,4% a 35,1%) que contienen la mayoría de las mezclas, por lo que es aún más difícil conseguir una superficie lisa que permita la uniformidad de la unión entre las placas de yeso y el papel envoltente.
- b. Que confirmaron un comportamiento esperado como fue, por ejemplo, la dificultad en el uso de residuos de EPS cortados. La aplicación de cuerpos cortados de residuos de espuma mayores de 1 cm planteó problemas de integración y de distribución homogénea dentro del material debido a su forma, su tamaño y su tendencia natural a flotar (etapa experimental 4.2).
- c. Que superaron el comportamiento esperado, como es el caso de las reacciones al fuego mostradas por los materiales con residuos molidos de EPS y aplicados en un producto con usos similares a un panel de aislamiento de EPS comercial.

Al inicio de las pruebas y en base a la investigación preliminar se estableció que algunas de las aplicaciones a ensayar mostrarían conductas indeseables de reacción al fuego. Sin embargo los resultados de las pruebas apuntaron hacia mejores reacciones que las esperadas y que permiten inclusive proponer nuevas aplicaciones para las mezclas ensayadas, como son los casos de paneles para recubrimiento de muros que no requieren otro material para su protección ante una llama puntual.

7.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Se ha comprobado que tanto las mezclas de placa y panel de residuos conglomerados ensayados, como sus aplicaciones en productos con usos similares a placas de yeso y en productos con usos similares a paneles de aislamiento térmico de EPS, muestran características propias de las cuales se describen las de mayor interés:

a. Propiedades de las placas y los paneles con residuos de EPS

En términos generales las placas y los paneles que contienen residuos de EPS y que han sido ensayados, muestran propiedades algo menores que los materiales comerciales (como una mayor absorción de agua) y las mezclas de referencia que sirvieron de comparación. También, de los ensayos realizados se obtiene información sobre mezclas que superaron los comportamientos del material de referencia, como es el caso concreto de la mezcla 65 de **panel** de escayola con residuos, que mejoró algunas propiedades de la espuma virgen de EPS, como la resistencia a la compresión (79,7 kPa contra 63,97 kPa), la resistencia a la flexión (con 349 kPa contra 124,6kPa) y una mejor reacción al fuego (Clase C, s1, d0) (ver tabla 7.1). La mezcla seleccionada de **placa** de yeso aligerada número 49, reporta mejoras de densidad laminar (7,69 kg/m² contra 10 kg/m² de la placa comercial) para un grosor constante de 12,5 mm. Tabla 7.2.

Tabla 7.1 Comparación de resultados entre la placa comercial y la placa seleccionada (49)

No. de mezcla	Fórmula	Absorción agua %	Densidad laminar (kg/m ²)	Resist. a la flexión (N)	Reacción al fuego (Euroclases)	Resistencia al impacto (ø mm)
49	Yeso rápido100+A80+MG 1,6. 12,5 mm	56,1	7,69	234	B, s2, d0	22,29
Placa	Placa de yeso laminado, estándar (STD) 12,5 mm.	54,7	10	273	A2, s1, d0	17,3

Tabla 7.2 Comparación de resultados entre el panel de EPS virgen y el panel seleccionado (65)

No. de mezcla	Fórmula	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/m ³)	Resist. a la flexión (kPa)	Cond. térmica (W/mK)	Reacción al fuego Euroclase	Resist. Comp. (kPa)
65	E100+A 500 +MG 8,1	20,7	193	349,9	0,065	C, s1, d0	79,7
Panel EPS	Tipo III estándar	2,9	15	124,6	0,039	F	63,97

Cada uno de los resultados de interés obtenidos y las comparaciones con sus materiales de referencia se han revisado a detalle durante los análisis de resultados de cada prueba. Los puntos de mayor interés se exponen en este capítulo en el apartado de conclusiones sobre las propiedades de las placas y paneles ensayados (apartado 7.4). El conjunto de ensayos y sus resultados de exponen con detalle en la sección de conclusiones del capítulo 6 (ver apartado 6.4, tablas 6.4.1 y 6.4.3).

b. Aplicaciones en la construcción

En base a los ensayos realizados es posible afirmar que las placas y paneles con residuos conglomerados de EPS que se han ensayado en esta investigación, pueden cumplir con los usos de placas de yeso laminado y paneles de EPS comerciales para la construcción pero con solicitudes menores para algunas de sus características.

Los nuevos elementos de placas y paneles con residuos de EPS han demostrado en los ensayos ser adecuados para usos en interiores o para ser instaladas en zonas protegidas de los elementos del medioambiente, especialmente de la lluvia o de la humedad. Una razón para ello es la mayor absorción de agua que reportan las mezclas seleccionadas y que provocan el deterioro de sus propiedades.

- Es posible que en algunas composiciones de mezclas y para algunas aplicaciones se necesite de una barrera de vapor para mantener sus características.
- Para el caso de las mezclas seleccionadas para **placa**, la fórmula 49 tiene una absorción de agua de 56,1% mientras que la placa de yeso comercial tiene una absorción del 54,7%; aunque la diferencia en puntos porcentuales entre las dos placas comparadas es mínima, confirma la forma de uso para interiores especificada por el fabricante de la placa de yeso laminada estándar [KNAUF03].
- Para la fórmula 65 seleccionada para **panel** de residuos conglomerados, la absorción es de 20,7% que es mayor que la reportada por el EPS virgen de 2,9%. Aunque esta diferencia en la absorción es elevada, dadas las aplicaciones de los paneles (adosados a muros, en cámaras de aire, aislamiento de techos, techos suspendidos y cielorrasos) siempre se encuentran protegidos con algún otro material, y por lo tanto es poco probable el contacto del elemento constructivo con el agua.
- Se debe promover el uso de los elementos constructivos que contienen residuos de EPS para ser instalados de manera vertical (como revocos de paredes o como sustitución de enlucidos) y apoyados sobre un cerramiento plano y sin interrupciones. El uso de la **placa aligerada** en posición vertical se debe a su menor resistencia a la flexión (234 N) y a su menor resistencia al impacto (22,29 mm de huella) comparada con la placa de yeso estándar (273 N y 17,3 mm de huella). Tabla 7.1.

c. Manipulación y maquinado de los elementos con residuos de EPS

Se demostró que las **placas** fabricadas con las mezclas propuestas pueden ser manipuladas y dimensionadas para su instalación de manera semejante a las placas comerciales. Durante el trabajo experimental las placas con residuos fueron transformados de diferentes maneras y únicamente con herramienta manual.

Por su parte los **paneles** fabricados con mezclas de residuos de EPS y conglomerantes son menos flexibles (dados los desplazamientos mostrados en el ensayo de flexión 6.3.5, tabla 6.3.20) que la espuma virgen y por lo tanto más susceptibles de sufrir deterioro durante su manejo y maquinado. Sin embargo, durante los ensayos se comprobó que en los paneles ensayados con fórmulas de elevadas proporciones de conglomerante como las mezclas 64 (Escayola-agua al 300% y EPS molido grueso al 14,4%) o la 65 (Escayola al 200% y Residuo molido grueso al 8,1%) su manejo y maquinado no se apartan notoriamente del cuidado necesario para el manejo de los paneles vírgenes de EPS usados actualmente en la construcción.

Durante los ensayos no se han logrado calidades semejantes a las placas de yeso laminado estándar, con respecto a la unión del papel con el núcleo de las probetas de yeso o escayola con residuos de EPS. Se espera que durante su fabricación sea factible conseguir una unión satisfactoria de la celulosa.

7.4 CONCLUSIONES DE LAS PROPIEDADES DE PLACAS Y PANELES

Otras consideraciones técnicas que resultan de la etapa experimental de la tesis son las siguientes:

a. Variaciones en el comportamiento de las mezcla

Los materiales y probetas ensayadas muestran comportamientos variables dado que su fabricación involucra el uso de materiales que provienen de los residuos municipales de EPS, cuyas características dependen en gran medida del producto de espuma que se ha recuperado. En el capítulo 4, apartado 4.1.4, en los análisis sobre las características de los residuos molidos (MG) que se usaron para la fabricación de las probetas, se observó que el promedio de perlas completas es del 69% mientras las perlas que se encuentran afectadas de alguna manera es del 31%. Dentro del 69% de las perlas de EPS completas se determinaron 3 tamaños de perlas, donde predominan con el 45% las de tamaño mediano (3 a 5 mm de diámetro), un 17 % de perlas grandes (5 mm o más) y 14 % de perlas pequeñas (menos de 3 mm). Como se puede deducir de estos datos, los residuos molidos de EPS presentan poca uniformidad en cuanto al tamaño de las perlas que lo componen y que ha influido en las diferencias reportadas durante los ensayos aplicados a las probetas de placas y paneles fabricados para este experimento.

A la variabilidad del comportamiento de las probetas que contienen residuos de EPS también coopera el proceso de fabricación manual con la cual fueron hechas y que permitió la obtención de muestras razonablemente iguales pero que en los ensayos reportaron algunas diferencias que en ocasiones obligaron a declarar nulos algunos materiales ensayos.

La fabricación manual de probetas por medio de moldes de silicona es común en la industria fabricante de placas de yeso, donde el desarrollo de nuevos productos se realiza en sus laboratorios de control de calidad, dada la imposibilidad de afectar el ritmo de producción continuo. Un dato que ejemplifica la intensidad de producción es la empresa *Yesos Ibéricos y Española de Placas de Yeso (EPYSA)* que comercializa la marca Pladur®, produce anualmente 28 millones de m² lo que equivale a 76 712 m² de placa de yeso laminado por día [IGME03].

b. Absorción de agua

Durante los experimentos las series de probetas ensayadas tanto de las de placa de yeso con residuos como las de panel de residuos, mostraron tendencias a absorber mayores volúmenes de agua, que aquellas de los materiales con las cuales se compararon.

Para el caso de las **placas** con residuos de EPS la media de incremento en peso por de absorción de agua fue 75% contra el peso seco de la muestra, mientras para una probeta de placa estándar esta fue de 54,7% aunque esta diferencia se acorta en la mezcla seleccionada de placa número 49 con un 56,1%. Se puede observar en los ensayos que mientras mayores son los porcentajes de agua de amasado y de residuos empleados mayor es la absorción de la placa (tabla 7.3).

Tabla 7.3 Comparación de la absorción de agua después de la inmersión de placa

No de Mezcla	Fórmula	Incremento en peso (%)
Placa yeso laminado	Comercial estándar	54,7
42	YC100+A 120 + EPS MG2	74,8
44	YC100+A 120 + EPS MG 3	83,9
45	E100+A 120 + MG 3	85,2
49	YR100+A 80 + MG 1,6	56,1
Media con residuos		75

De los ensayos se observa que también los **paneles** fabricados con residuos tienen una absorción de agua mayor que la espuma virgen. Mientras la absorción de la espuma de EPS fue de una media de 2,9%, para las mezclas de panel con residuos 65 fue de 20,7% y para la mezcla 66 fue de 24,4% (ver apartado 6.4, tabla 6.4.3).

Aunque no se realizó ningún experimento relativo a tema, por la investigación preliminar de la tesis se sabe que la presencia de agua en la estructura del yeso o escayola deprime la resistencia mecánica de la estructura porosa del conglomerante [ARRED91]. De la investigación preliminar y de los resultados obtenidos del ensayo sobre placas y paneles con residuos de EPS, se hace evidente la necesidad de disminuir la absorción de agua en esos elementos constructivos. La menor presencia de agua se puede obtener a través de la impregnación de los envoltentes [LAFFAR95] (para el caso de las placas con residuos de EPS) con resinas naturales o sintéticas; también se obtienen resultados satisfactorios con la adición de un agregado de vermiculita exfoliada [VILLAN01] o de sustancias impermeabilizantes como silicona o alguno de sus derivados o bien pequeñas cargas de otros conglomerantes como cemento o cal durante el amasado. En el anexo A.2, apartado A2.4.4.5 se describen algunos impermeabilizantes que también pueden ser usados para la producción de placas y paneles con residuos de EPS conglomerados.

c. Conductividad térmica

En cuanto a la conductividad térmica obtenida del ensayo correspondiente, se ha determinado que un panel de residuos conglomerados tiene una conductividad térmica más alta que un panel de espuma virgen. Esto se puede explicar si recordamos que los elementos propuestos de placa o panel están conglomerados en distintas proporciones de yeso o escayola, y siempre es importante la aportación de este material a la conductividad global del material compuesto. Sin embargo, no siempre es posible disminuir las proporciones de conglomerantes en los productos propuestos ya que sus otras propiedades y su aceptable manejo en obra, parecen estar en relación directa con la mayor o menor presencia de yeso o escayola; de aquí que se hacen propuestas de fórmulas de conveniencia.

d. Densidad aparente y resistencia de placas y paneles

Durante la investigación se proponen fórmulas de mezclas para **placa** que ofrecen un producto más ligero ($5,55 \text{ kg/m}^2$) que el material comercial (10 kg/m^2), que no igualan la resistencia a la flexión de la placa estándar (272,7 N) pero que se acercan a sus prestaciones, como son las mezclas 45 (189,4 N) y 49 (234 N). Tabla 7.4.

Sin embargo, al aumentar la ligereza de las **placas** se promueve su fragilidad, como se observa en la misma tabla, donde al crecer las proporciones de agua de amasado y de residuos de EPS, de forma simultánea disminuye la resistencia a la flexión hasta un 44% con relación a las muestras de placa de yeso estándar.

Tabla 7.4 Comparación de densidad aparente y resistencia a la flexión de placas ensayadas.

Número de mezcla	Fórmula	Densidad laminar (kg/m ²)	Disminución en peso contra la placa comercial (%)	Resistencia a la flexión (N)
Placa yeso	Comercial estándar	10	-	272,7
49	YR100+A 80 + MG1,6	7,69	23,1	234
45	E100+A 120 + MG 3	5,55	44,5	189,4
44	YC100+A 120 + MG 3	5,57	44,3	175,4
42	YC100+A 120 + MG 2	6,22	37,8	152,4

Por lo que respecta al **panel** seleccionado 65 tiene una densidad mayor que la de la espuma virgen de referencia (15 kg/m³). El aumento de densidad en los materiales que contienen residuos de EPS es inevitable debido a la masa del conglomerante usado para lograr la formación del panel, lo que conlleva a los aumentos de densidad aparente (64 - 280 kg/m³) de los paneles ensayados. El aumento de densidad del panel con residuos 65 va acompañado de un aumento en la resistencia a la flexión (349,9 N) y un aumento de la resistencia a la compresión (79,7 kPa), que ofrecen en conjunto mejores prestaciones que los paneles de espuma virgen de EPS (tabla 7.5).

Tabla 7.5 Comparación de densidad, resistencia a la compresión y a la flexión de paneles

Número de mezcla	Fórmula	Densidad aparente. (kg/m ²)	Compresión (kPa)	Resistencia a la flexión (N)
Panel EPS virgen	Tipo III comercial	15	63,97	124,6
Panel mezcla 65	E100+A 200 + EPS MG 300	193	79,7	349,9

- Las propuestas de uso de las mezclas de **placa** con residuos en productos con usos similares a la placa de yeso, el ensayo permitió mostrar en todas las muestras una menor densidad que las placas de yeso comerciales; en alguno de estos casos la pérdida porcentual de peso fue muy notoria. En concreto, para la mezcla de placa seleccionada 49 se obtuvo una disminución del 23,1% en peso de la placa comercial (tabla 7.4).
- Del ensayo de densidad aparente podemos concluir que las mezclas experimentadas ricas en residuos de EPS usadas para moldear **paneles** con aplicaciones similares a paneles de aislamiento térmico de EPS, siempre son de una densidad más alta que las densidades de la espuma de EPS virgen. Esto es explicable dada la presencia del conglomerante en el material compuesto y la densidad aparente obtenida de la mezcla esta en relación directa a la proporción de residuo de EPS empleados ya la cantidad de conglomerante y de agua usados para su preparación.

Por otro lado las densidades obtenidas son competitivas con otros aislantes convencionales para la construcción como se muestra en la tabla 7.6.

Tabla 7.6 Comparación del panel con otros materiales aislantes comunes en la construcción

Material	Densidad aparente kg/m ³
Panel con residuos de EPS mezcla 65	193
Plafones aislantes ligeros de fibras*	240-350
Plafón aislante semipesado de fibras*	350-800
Placas de paja comprimida*	365
Placas de lana de madera*	450

*Fuente: Sastre, R. (2000) *Propietats dels materials i elements de construcció*. Barcelona: UPC. p: 21.

e. Comportamiento ante el fuego

La seguridad ante el caso de incendios en un recinto es siempre de gran importancia y así lo demuestra el amplio trabajo desarrollado por los especialistas de este tema en la Unión Europea. En concordancia con lo anterior una conducta a investigar durante los trabajos de experimentación fue la de las reacciones al fuego de los elementos fabricados con residuos de EPS conglomerados.

- Los resultados obtenidos de la experimentación a la reacción al fuego permiten señalar que las mezclas de **paneles** de residuos molidos de EPS conglomerados con escayola pueden usarse para la fabricación de elementos constructivos como lo indican las clasificaciones propuestas. Tabla 7.7. (Detalles en el ensayo de reacción al fuego 6.2.4).

Tabla 7.7 Propuesta de clasificación en Euroclases de paneles ensayados

Material	Clasificación Euroclases
EPS – N (normal estándar)	F (sin clasificar, sin comportamientos determinados)
EPS – SE (comercial autoextinguible)	E (combustible con baja contribución de fuego)
Panel de mezcla 65 (E100+A 200 + MG 8,1)	Clasificación propuesta : C, s1, d0 (combustible con contribución limitada al fuego. Baja cantidad de humos. No se producen gotas inflamadas)

- El ensayo de reacción al fuego aplicado a las **placas** de yeso con residuos de EPS sin recubrimiento de cartón, ha confirmado su clasificación al mismo nivel que las placas de yeso comerciales ensayadas, que según las Euroclases sería A2, s1, d0 y que la define como un producto no combustible y por lo tanto es un elemento constructivo seguro contra el fuego. La misma **placa** de yeso con residuos pero con recubrimientos de cartón (clave de mezcla 49), se clasifica como B, s2, d0, lo que califica a la placa aligerada como un producto poco combustible. Tabla 7.8.

Tabla 7.8 Propuesta de clasificación en Euroclases de las placas de yeso ensayadas

Material	Clasificación Euroclases
Placa de yeso STD (normal estándar) M-1 (clasificación española)	A2, s1, d0 (no combustible. Baja cantidad y velocidad de emisión de humos. No se producen gotas inflamadas)
Placas de yeso con EPS sin cartón (42, 44, 45, 49)	Clasificación propuesta : A2, s1, d0 (no combustible. Baja cantidad y velocidad de emisión de humos. No se producen gotas inflamadas)
Placa de yeso con EPS mezcla 49 (YR100+A 80 + MG 1,6) con cartón	Clasificación propuesta : B, s2, d0 (poco combustible Cantidad y velocidad de emisión de humo medias. No se producen gotas inflamadas)

7.5 CONCLUSIONES DE LA FABRICACIÓN DE LAS PLACAS Y PANELES

La fabricación de los elementos constructivos hechos con mezclas de residuos de EPS conglomerados con yeso o escayola:

La placa de yeso comercial se obtiene por un proceso continuo de grandes volúmenes de fabricación y altamente automatizado (Anexo A2). El proceso se pudo observar durante la fase de investigación preliminar donde se visitó la empresa Knau® fabricante de placas de yeso laminado que declara una transformación de 150 T/h y una producción en el año 2002 del 27 millones de m², que para el año 2003 esperaba aumentar su producción en 30 millones de m² [KNAUF04].

Para la producción de las probetas ensayadas en esta investigación y que corresponden a una aplicación de usos similares a una placa comercial se ha empleado un procedimiento de moldeado manual y con herramientas simples. No obstante la diferencia entre las formas de producción mencionadas se piensa que es posible la integración de residuos de EPS molidos en los sistemas de fabricación de placa comercial (estándar) considerando y solucionando los siguientes puntos:

a. Diferencias de características

Las formas de fabricación de las probetas de placas y paneles con residuos de EPS que se han ensayado son diferentes a los sistemas que se usarían para su fabricación en masa. Este hecho puede determinar algunas diferencias en las propiedades de los productos obtenidos industrialmente, aunque se usen los mismos materiales o componentes muy semejantes.

b. Intensidad de la producción

Por su misma intensidad de producción los sistemas de fabricación de placas de yeso usan mezclas de baja viscosidad para alimentar sus bandas de producción y formar los núcleos de yeso. Se estima que el tiempo de amasado de sus componentes se realiza entre 1–2 min. Los ensayos han demostrado que para lograr una integración satisfactoria de los residuos de EPS en una mezcla de baja viscosidad se requiere entre 2–4 min de amasado después de mezclar los componentes (Capítulo 5 tabla 5.13). Una vez ajustados los dispositivos mecánicos usados en las empresas se puede disminuir los tiempos de integración de los residuos de EPS a la mezcla que formará el elemento constructivo.

c. Espesores

La industria española de la placas de yeso ofrece sus productos con espesores estándar que van desde los 6,5 hasta los 19 mm [PLADUR03]. De la medición de los residuos realizado durante la investigación (apartado 4.1.3.4) resulta que en la composición por tamaños de los dos tipos de residuo ensayados (MG y MF) predominan los cuerpos de espuma de entre 3 – 5 mm de diámetro y los conjuntos de partículas de EPS y cuyos porcentajes sumados son un 61% del total de la muestra y que dificulta su uso en placas de espesores menores de 12,5 mm.

Se observó en los ensayos que a falta de conglomerante en las placas de espesor menor a 12,5 mm, las perlas no pueden ser integradas por el núcleo de yeso y tienden a flotar durante el fraguado hacia la superficie de la mezcla (capítulo 4, apartado 4.2.1.5). En las placas de mayores o iguales espesores a 12,5 mm hay más cantidad de conglomerante lo que tiende, con su peso y su aumento de densidad durante el fraguado, a disminuir la migración de las perlas a las capas superiores del núcleo.

d. Productos bicapa de residuos conglomerados

Por otro lado la tendencia a flotar de los residuos dentro del núcleo de yeso durante el fraguado [HANSJ78] puede ser aprovechada para el diseño de nuevos productos que ofrezcan una capa de yeso homogéneo, mientras las capas interiores están formadas de residuos suspendidos dentro del conglomerante a similitud de una espuma plástica de piel integral. La capa rica en yeso o escayola puede ser decorada como un enlucido convencional mientras el dorso con una apariencia rugosa se instalará adosada al muro. Esta propuesta se mostró viable durante los ensayo practicados en la etapa Exploratoria de mezclas (apartado 5.1.1.3.b, conjunto de trabajo 4) con las mezclas clave 32, 33 y 34.

e. Apariencia de las placas con residuos de EPS

Las placas producidas con cargas de residuos de EPS han mostrado una cara lisa muy similar a las actuales placas comerciales y su dorso levemente rugoso, que resulta de la flotación de los residuos hacia las capas superiores del núcleo de yeso o escayola.

En las placas de yeso laminado comercial, estas texturas lisas se deben a que durante casi todo su fraguado la cara de la placa durante el vaciado y el fraguado, está en constante contacto con la banda transportadora que es plana, mientras el espesor de la placa se asegura mediante sistemas de nivelado transversales al sentido del movimiento de la banda transportadora, que al mismo tiempo también aplanan el dorso de la placa. Finalmente, un conjunto de cepillos gruesos al girar sobre el envoltente de cartón de la placa, dan un acabado terso al dorso de la placa (ver anexo A 2). El sistema expuesto funciona perfectamente para las mezclas de yeso o escayola con las que se fabrican hoy las placas comerciales. En cambio la integración de residuos molidos de EPS en este sistema plantea la necesidad de:

- Ajustar los componentes y proporciones de masa yeso-agua a la velocidad de fraguado para que no favorezca la flotación, sino que al fraguar el cambio de densidad atrape rápidamente a los residuos e impida su migración a capas superiores.
- Asegurar que los actuales sistemas de alisado del dorso de la placa sean capaces de obtener los mismos o similares resultados en placas con residuos molidos de EPS.

f. Considerar que las plantas productoras de placa de yeso se encuentran por lo general cerca de la cantera de piedra de aljez, ya que las mismas empresas productoras de

placas procesan el yeso necesario para su producción, lo que las ubica normalmente en puntos alejados de los centros de recolección y acondicionamiento de los residuos de espuma. El que los residuos molidos de EPS se tengan que transportar desde puntos alejados a la fábrica de placas de yeso impactará los costes del nuevo elemento constructivo con residuos molidos de EPS.

- g. Considerar que los residuos molidos ensayados han mostrado características heterogéneas que complica el cumplimiento de los requisitos de calidad de las empresas. Para su aplicación en procesos de fabricación con rigurosos controles de calidad como los de las modernas fábricas de placas de yeso laminado, se requiere que el reciclador de plástico haga más eficiente sus sistemas de molienda y cribado de residuos de EPS, que permitan disminuir las variaciones en las dimensiones de los molidos.
- h. Los paneles para tabique y otros elementos constructivos de yeso como molduras y remates se fabrican en empresas medianas o pequeñas que emplean técnicas poco automatizadas con volúmenes de producción menores a otras empresas que se han mencionado. En términos generales la técnica empleada por esas empresas consiste en el amasado del yeso o la escayola para después vaciar en moldes metálicos que se cierran mecánicamente, los productos en proceso son conducidos a un horno de secado de baja temperatura (70 ± 5 °C) donde completan su endurecimiento (capítulo 3, apartado 3.3.1). El proceso de colada de yeso usado por los pequeños y medianos fabricantes de elementos constructivos de yeso o escayola, se muestra como una opción viable para la producción de los elementos constructivos de placa y panel ensayados y que contienen residuos molidos de espuma.

7.6 CONCLUSIONES DE LAS VENTAJAS DE LOS PANELES Y PLACAS DE YESO CON RESIDUOS DE EPS

De lo expuesto podemos deducir las siguientes ventajas de los materiales y elementos propuestos:

- a) Una ventaja de los nuevos materiales ensayados es la abundancia y disponibilidad de sus componentes principales: El yeso y la escayola son materiales que se producen en todo el mundo y son especialmente disponibles en España, a lo que se agrega que la industria que los transforma está en su mayoría tecnificada, lo que le permite ofrecer suministros de materia prima de excelente calidad [VILLAN01].

Por otra parte, los residuos de EPS susceptibles de emplearse para la obtención de residuos molidos son principalmente embalajes que se consumen también de manera abundante. Como se indica en la investigación preliminar (capítulo 1, apartado 1.2.5.1) la producción de embalajes de EPS crece año con año, por lo que su disponibilidad para ser reciclados y usados en los usos en los que se han ensayado aquí se muestra positiva.

- b) Para la recuperación de los residuos de EPS, la etapa de separación de entre otros residuos es sencilla, ya que en la mayoría de los casos no hay que atender sistemas de identificación especializados; su ligereza y color facilitan su selección manual en cualquiera de las etapas del reciclaje.
- c) La preparación y modificación de los residuos de espuma recuperados es simple si los residuos se encuentran limpios. Basta con introducirlos en un molino mecánico convencional para plásticos (detalles en reciclaje mecánico, apartado 1.2.3.5.c), sin embargo, si las espumas se encuentran sucias o contaminadas habrá que determinar si su lavado y su posterior molido son viables, o de lo contrario, esas espumas serán

dispuestas a los flujos convencionales de reciclaje de plásticos o para su valoración energética, o en última instancia para su destino final en el vertedero.

- d) La ligereza de las **placas** y **paneles** fabricados con las mezclas ensayadas, en especial para el caso de los usos similares a los de las placas de yeso, resulta conveniente para todos los que intervienen en la producción de los elementos constructivos y su instalación en obra, como se muestra en la tabla 7.9.

Tabla 7.9 Comparación de densidades de placas con residuos de EPS con placas estándar

No. de mezcla	Fórmula	Densidad laminar (kg/m ²)	Placa comercial estándar (kg/m ²)
42	YC100%+A 120%+MG 2%	6,22	10
44	YC100%+A 120%+MG 3%	5,57	10
45	E100%+A 120%+MG 3%	5,55	10
49	YR100%+A 80%+MG 1,6%	7,69	10

Para el fabricante representa un producto más fácil de transportar dentro de la planta y hacia su lugar de consumo. Para los instaladores y otros operarios de obras de construcción la mayor ligereza del nuevo producto representa más facilidad para su transporte y manejo en obra.

- e) Los usos que se dan a las placas de yeso comercial estándar generalmente es de recubrimiento adosado a muros o cerramientos y particiones interiores que después son pintados o se les aplica otros tipos de acabado [VILLAN01]. Estos usos también se les pueden dar a las **placas** con residuos de EPS aunque en sitios con menores solicitaciones de resistencia mecánica, como se menciona en el apartado 7.3 punto b, Aplicaciones en la construcción, de estas conclusiones.
- f) El **panel** o la plancha de espuma de EPS virgen se usa en la construcción de recintos como aislante térmico adosado a paredes o techos, también se instalan en las cámaras de aire entre muros o bien en un elemento transformado con una o dos placas de otros materiales como un acabado de melamina, chapa de madera o una chapa de metal. En todos los casos la cara libre del panel debe de estar siempre protegida por algún material más resistente al impacto pero principalmente al fuego. Los ensayos de los paneles con residuos de EPS conglomerados han demostrado que pueden cumplir con las funciones arriba descritas pero siempre considerando las limitaciones en sus propiedades que se han evidenciado en los experimentos.
- g) La **placa** de yeso con residuos puede ser usada como recubrimiento de paredes con o sin el uso de un panel aislante térmico adosado a ella. También puede usarse con fines de protección al fuego en estructuras secundarias de un edificio.
- h) El **panel** de residuos de EPS conglomerados (mezcla 65) muestra un coeficiente de conductividad (λ) térmica promedio de 0,065 W/mK, que resulta mayor un 66% con respecto al coeficiente de conductividad térmica del EPS virgen tipo III (0,039 W/mK), y 62% mayor que el coeficiente de conductividad térmica (0,040 W/mK) de la espuma de poliuretano (PUR), lo cual ilustra que el panel 65 desarrollado en esta tesis tiene una capacidad menor de aislamiento que otros materiales comunes aislantes en la construcción. Tabla 7.10.

Tabla 7.10 Comparación del panel de residuos de EPS con otros materiales constructivos para muros

Descripción del material	Coefficiente de conductividad térmica W/mK
Espuma de poliuretano ¹	0,023/0,040
Poliestireno extruído ¹	0,033
EPS III ² y corcho ¹	0,039
Panel de escayola con residuos de EPS	0,065
Placa de yeso laminado ¹	0,30

Fuentes:

1 Sastre, R. (2000). *Propietats dels materials i elements de construcció*. Barcelona: UPC. p: 65-66.

2 ANAPE.(2004) *Propiedades físicas del poliestireno expandido*. En línea. <http://www.anape.es>. Madrid: ANAPE.

7.7 CONCLUSIONES DE LAS DESVENTAJAS DE PANELES Y PLACAS DE YESO CON RESIDUOS DE EPS

La investigación de tesis y el trabajo experimental del proyecto han indicado las desventajas de las mezclas de residuos de EPS en los elementos constructivos ensayados, como se describen:

- a) Es una costumbre difundida la de relacionar productos de reciclaje con productos baratos pero de mala calidad, aunque sin fundamento; ello representa un serio obstáculo para los materiales como los que se investigaron en esta tesis.
- b) Se considera que conforme se consolide la aplicación de normativas europeas que fijan cuotas mínimas de reciclaje a cumplir, y se desarrollen acciones concretas hacia el reciclaje por parte de organizaciones de ciudadanos o de empresarios, el desarrollo y fabricación de productos similares a los que se han investigado tendrán una mejor acogida por el mercado.
- c) Dado que algunas propiedades de las placas y los paneles que contienen residuos de EPS son menores que las de los materiales estándar similares, hacen que el atractivo de los materiales propuestos sea moderado. Como ejemplo de la experimentación señalamos que la placa con espesor de 12,5 mm fabricada con la mezcla 49 es 23% más ligera que la placa estándar, además tienen una absorción de agua parecida (56,1% contra 54,7%) pero su resistencia a la flexión es 14% menor. Tabla 7.11.
- d) Los ensayos han demostrado que el manejo de los elementos constructivos propuestos en las obras de construcción es más delicado que los materiales tradicionales.

En el caso de las **placas** se debe a que la presencia de residuos en el yeso o la escayola provoca grandes poros dentro del núcleo del cuerpo de la placa endurecido y que debilitan mecánicamente al conjunto [RÍO02].

Tabla 7.11 Comparación de algunas propiedades de resistencia mecánica entre placas ensayadas de yeso o escayola con y sin residuos

Clave de mezcla para placa	Fórmula	Resistencia a la flexión (N)	Resistencia al impacto. Huella Ø (mm)
Placa estándar comercial	-	273	17,3
42	YC100+A 120 + MG 2	152,4	21,98
44	YC100+A 120 + MG 3	175,4	23,11
45	E100+A 120 + MG 3	189,4	22,14
49	YR100+A 80 + MG 1,6	234	22,29

En los **paneles** aislantes de residuos, las grandes cantidades de cuerpos expandidos de plástico celular conglomerados con escasas masas de yeso o escayola, producen materiales compuestos de limitada resistencia a los esfuerzos comunes de manipulación en las obras (tabla 7.12). Esto obligará a adicionar los paneles de residuos conglomerados con lienzos de cartón o papel pegado a una o ambas caras lo que le conferirá una resistencia suficiente al elemento constructivo. Además en las aplicaciones propuestas se han de manejar con mayor delicadeza que otros materiales similares.

Tabla 7.12 Comparación de algunas propiedades de resistencia mecánica entre un panel de EPS estándar con paneles de escayola y residuos

Número de panel	Fórmula	Resistencia a la Compresión al 10% (kPa)	Resistencia a la flexión (kPa)
Panel EPS Estándar	Densidad 15 kg/m ³	63,97	124,6
55	E100+A 500 + MG 35,1	-	31,4
64	E100+A 300 + MG 14,4	48,2	180,2
65	E100+A 200 + MG 8,1	79,7	349,9
66	E100+A 120 + MG 6,4	86,5	154,4

- f) La placa de yeso con residuos de espuma al estar recubierta sólo con cartón o papel, requiere para una mejor apariencia y protección de un acabado final cuando el elemento ha sido colocado en obra. Se tendrá que pintar o recubrir con un acabado decorativo convencional. Esto representa una desventaja relativa para las placas y paneles con residuos conglomerados dado que las placas y paneles estándar también han de recibir un tratamiento similar en una obra de construcción.
- g) Los sistemas de recuperación de residuos de envase y embalaje de EPS estructurados por asociaciones de fabricantes españoles (programa ECO-EPS en España) se muestra prometedor con un crecimiento anual cercano al 6,8% (alrededor de 2 000 T por año) de EPS reciclado que proviene principalmente de residuos de envase y embalaje. Sin embargo el programa ECO-EPS como proveedor de residuos molidos de EPS aún se encuentra en proceso de consolidación lo que puede ser en este momento un motivo de escepticismo en los sectores interesados en desarrollar los productos que se proponen en esta tesis.

7.8. CONCLUSIONES ACERCA DEL USO DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE EPS CON YESO O ESCAYOLA COMO PASTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN.

El uso de mezclas de residuos de EPS con yeso o escayola en usos diferentes a placa o panel para la construcción quedan fuera de los alcances de esta tesis. Sin embargo a lo largo del trabajo experimental se han llevado a cabo ensayos de compresión, densidad aparente y resistencia a la flexión de 4 mezclas de yeso o escayola (números 42, 44, 45 y 49) para aplicarse en futuros proyectos de pastas para la producción. Los resultados completos de estos ensayos se encuentran en los anexos de esta tesis (Anexo A.3).

a. Ensayo de compresión

Los resultados permiten comprobar que hay una relación entre la cantidad de agua empleada para la fabricación de los cuerpos fraguados de yeso o escayola y su resistencia a la compresión, donde una mezcla amasada con una proporción de agua del 1,2 es 76% menos resistente que las mezclas fabricadas con una relación de agua del 0,8.

Las mezclas 42, 44, 45 y 49 muestran valores de resistencia a la compresión menores que las probetas con las mismas proporciones sin residuos de EPS. La resistencia a la compresión de las mezclas con residuos puede ir de 16% al 31% de la resistencia de los materiales con la misma cantidad de agua de amasado sin residuos.

b. Ensayo de densidad aparente

Se ha comprobado que es posible disminuir la densidad de un cuerpo fraguado de yeso o escayola amasando mezclas ricas en agua (120% o más) y al mismo tiempo agregando residuos de EPS. En las mezclas ensayadas esta disminución de masa puede ir desde un 43,1% hasta un 56% comparada contra sus probetas de referencia sin residuos de EPS.

c. Ensayo de flexión

Las probetas con relaciones altas de agua de amasado (120% o más) mostraron una pérdida de resistencia a la flexotracción que puede ir de un 38,4% al 80% comparadas con probetas con menor presencia de agua de amasado (0,8).

Las probetas con residuos de EPS resultan con pérdidas de resistencia mucho mayores que las mezclas que no contienen residuos. Las comparaciones indican que las mezclas con residuos de EPS tienen una resistencia a la flexión que se ubica entre el 5,4% y el 20% comparado con mezclas iguales pero sin la presencia de residuos.

7.9 CONCLUSIONES FINALES

- a) Se ha logrado ofrecer un grupo de propuestas concretas para el reciclaje de EPS que buscan alargar la vida útil de los residuos de EPS aprovechando las propiedades de este material cuando se convierte en un plástico de post-consumo.

Esta manera de reciclaje de los residuos de EPS consiste en mezclarlos con yeso o escayola y agua para constituir una mezcla, que se moldea para formar placas y paneles para la construcción.

Las proporciones de los componentes de las mezclas que ofrecieron mejores resultados durante los ensayos fueron los siguientes (figura 7.1):

- **Placa** para usos constructivos (**mezcla 49**): Yeso Rápido al 100%, Agua al 80% y Residuos de EPS Molido Grueso al 1,6%, todos los porcentajes en relación al peso seco del yeso.
- **Panel** aislante térmico (**mezcla 65**): Escayola al 100%, Agua al 80% y Residuos de EPS Molido Grueso al 8,1%, todos los porcentajes en relación al peso seco de la escayola.

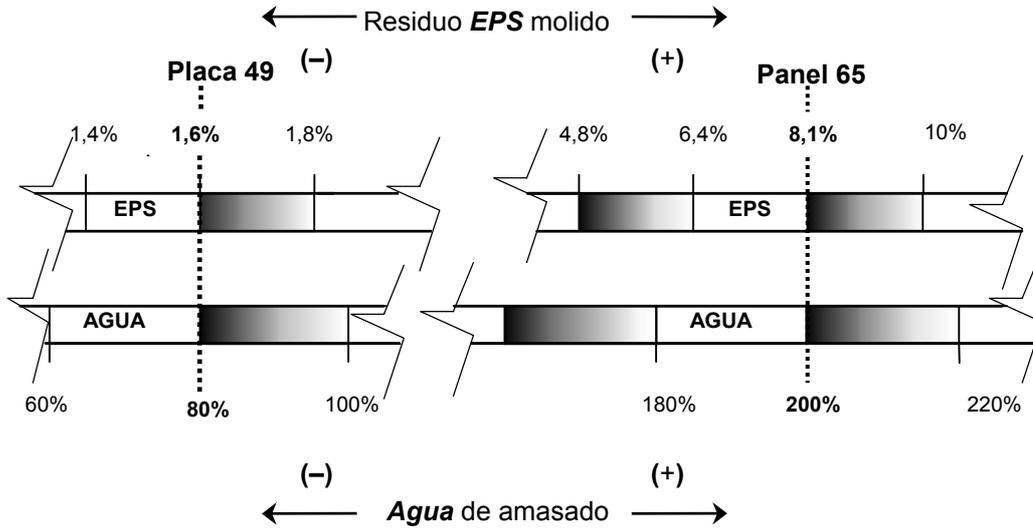


Figura 7.1 Proporción de relación yeso-agua + residuos de EPS para la placa 49 y proporción escayola-agua + residuos de EPS para el panel 65

De los ensayos practicados las características de las mezclas con mejores resultados se indican en la tabla 7.13.

Tabla 7.13 Resumen de resultados de los ensayos aplicados a la placa seleccionada mezcla 49 y al panel seleccionado mezcla 65

No. de mezcla	Fórmula	Absorción de agua (%)	Densidad	Resist. a la flexión	Cond. térmica (W/mK)	Reacción al fuego Euroclase	Resist. a Comp. (kPa)	Resist. al impacto (Ø mm)
49 Placa	YR 100% + A 80% + EPS MG1,6%	56,1	Laminar (12,5 mm) 7,69 (kg/m ²)	234 (N)	-	B, s2, d0	-	22,29
65 Panel	E100% + A 200% + EPS MG 8,1%	20,7	Aparente 193 (kg/m ³)	349,9 (kPa)	0,065	C, s1, d0	79,7	-

Acerca de la **placa** de yeso, número de mezcla **49**, fórmula Yeso Rápido100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%:

- La placa de la mezcla 49 tiene una absorción de agua 14% mayor a la placa estándar comercial.

- Se obtuvo una reducción en 23,1% de densidad laminar de la placa 49 ($7,69 \text{ kg/m}^2$) en comparación con la placa comercial (10 kg/m^2) en placas de 12,5 mm de espesor.
- La resistencia a la flexión de la placa 49 cumple con la norma UNE 102035-1M:2001, superándola con 24 N.
- El ensayo de reacción al fuego permite proponer la clasificación en Euroclases de la placa 49 como B, s2, d0, que significa que es un producto poco combustible, con una cantidad y velocidad de emisión medias y donde no se producen gotas ni partículas inflamadas.
- La resistencia al impacto de la placa 49 excede la Norma (UNE 102035-1M:2001) en 2,29 mm, donde se indica que el máximo aceptado es una huella de 20 mm de \emptyset .

Acerca del **panel** de escayola, número de mezcla **65**, fórmula Escayola 100% + agua 200% + EPS Molido Grueso 8,1%:

- El panel 65 mostró una absorción de agua de 20,7%, que excede ampliamente los requisitos señalados por la norma UNE-EN 12087:1997.
- El panel 65 obtuvo densidades similares o superiores a los reportados en los trabajos de otros investigadores en materiales nuevos, con componentes similares a la fórmula de la mezcla 65.
- El panel 65 tendría una clasificación equivalente según la Norma UNE-EN 13163:2002 a un nivel BS 350 ($349,9 \text{ kPa}$) mayor que el nivel obtenido para el panel de EPS virgen densidad 15 kg/m^3 , que reporta un nivel de resistencia de BS 115 (124 kPa).
- La conductividad térmica obtenida para la mezcla 65 ($0,065 \text{ W/mK}$), excede a la conductividad térmica declarada para un panel de EPS virgen Tipo I ($0,057 \text{ W/mK}$) según la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, con 12,3%. La conductividad del panel 65 supera con 66% al panel de EPS Tipo III ($0,039 \text{ W/mK}$).
- La conductividad térmica del panel 65 se muestra similar o mejor a los resultados de conductividad de trabajos de otros investigadores en nuevos materiales de características parecidas a la mezcla ensayada. Tabla 6.3.12.
- La reacción al fuego del panel 65 mostró claras ventajas sobre las reacciones del panel de EPS virgen. El ensayo permite proponer una clasificación en Euroclases de C, s1, d0. (Material combustible, con contribución limitada al fuego. Baja cantidad de emisión de humos, donde no se producen gotas inflamadas) mientras que el EPS estándar o grado N, sin aditivo retardante de fuego se clasifica como euroclase F, mientras su clasificación en la norma española la califica como M4, es decir de alta inflamabilidad.
- La resistencia a la compresión del panel 65 se reporta con $79,7 \text{ kPa}$, superior al panel de EPS virgen que obtuvo $63,9 \text{ kPa}$. El panel 65 se clasificaría según la norma UNE-EN 13163 en CS(10)70.

Con atención a los resultados de esta tesis se puede aseverar que la forma de reciclaje de EPS desarrollada y su aplicación en la construcción, se ha propuesto para que sus resultados se obtengan de manera *simple*, económica y funcional. También se cumple con el objetivo de determinar las mejores mezclas de cada aplicación propuesta y que fue resultado de su caracterización por medio de los ensayos efectuados a cada material. Estas mismas

características hacen posible que otros colectivos en otras zonas del mundo se interesen en esta forma de reciclaje y puedan adaptarla a sus materiales, economías y formas de trabajo.

Acerca del uso de mezclas de residuos de EPS con yeso o escayola como pastas para la construcción.

Del conjunto de ensayos a las mezclas 42, 44, 45 y 49 de aplicación como aligerantes de **pastas** de yeso o escayola para la construcción, podemos señalar que si bien se obtienen mezclas de baja densidad y que puede también ser de interés para la disminución de los costos de construcción; estas ventajas se ven disminuidas por la pérdida de propiedades mecánicas que se han estudiado en las otras pruebas.

Las conductas en los ensayos señalan que las aplicaciones adecuadas para las **pastas** para la construcción pueden ser aplicadas como guarnecidos o revestimientos gruesos que requerirán enlucidos finos posteriormente, aunque para ello habría que considerar la tendencia de los materiales a absorber humedad y agua lo que deteriora sus propiedades, por lo cual su aplicación se ve limitada a zonas de interiores o alejadas de la lluvia.

De los ensayos de las mezclas 42, 44, 45 y 49 se concluye que es posible usarlas como pastas para la construcción con las siguientes aplicaciones específicas que habrán de ser confirmadas con otras pruebas:

- Agregados aligerantes para pastas de albañilería de yeso o escayola para aplanados de paredes.
- Agregados de pastas de escayola con residuos de EPS para la fabricación de complementos decorativos.

Bibliografía

- AAPE. (2003) Asociación Argentina de Poliestireno Expandido. *Productos y aplicaciones. Aislamiento Térmico*. [en línea]. URL <<http://www.aape.com.ar/Productos/pya03.htm>> [visita del 7 de agosto del 2003].
- AENOR. (1986) Norma UNE 102011:1986. *Escayolas para la construcción*. Especificaciones. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1998) Norma UNE 102020:1998. *Paneles fabricados de yeso o escayola de paramento liso para la ejecución de tabiques*. Especificaciones. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1983) Norma UNE 102021:1983. *Placas de escayola para techos desmontables de entramado visto*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1998) Norma UNE 102023:1998. *Placas de yeso laminado*. Condiciones generales. Especificaciones. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1983) Norma UNE 102024:1983. *Planchas lisas de escayola para techos continuos*. Condiciones generales. Especificaciones. Madrid: AENOR
- AENOR (1999) Norma UNE 102031:1999. *Yesos y escayolas de construcción*. Métodos de ensayos físicos y mecánicos. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1999) Norma UNE 102032:1999. *Yesos y escayolas de construcción*. Métodos de análisis químico. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2001) Norma UNE 102033:2001. *Placas de escayola para techos*. Métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2001) Norma UNE 102035:2001. *Placas de yeso laminado*. Métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1985) Norma UNE 102037:1985. *Yesos y escayolas de construcción*. Métodos de análisis de fases. Madrid: AENOR.
- AENOR (1985) Norma UNE 7050:1985. (4) 1R. Tamices de ensayo. Exigencias técnicas y verificación de tamices de chapa perforada. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1973) NTE-RTC-1973. Norma tecnológica de Edificación. *Revestimiento de techos continuos*. Madrid: AENOR.
- Agenda 21. (1992) *Conference on Environment and Development*. Río de Janeiro. UNO.
- Aguado, J. et al. (2003) Reciclado de Residuos de Plástico: Situación actual y perspectivas. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid. 86(570):539.
- AGRIFOAM. (2003) *ADFOAM. Agricultural Chips*. Australia: ADFOAM. [en línea]. URL <<http://www.adfoam.com.au/agrifoam.htm>>. [visita del 14 de agosto del 2003.]

- Alegre, José. (2002) ¿Qué hacemos con el EPS?. *Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 74:45.
- Almenar, R. (1993) Cap una Societat Sostenible. *Medi Ambient. Tecnologia y Cultura*. Barcelona: GenCat. Departament de Medi Ambient. 6: 24.
- Alonso, Ll.; Capella, F. (1996) Políticas y sistemas de reciclado de plásticos. *Revista Plásticos Universales*. Munich: Hanser. mayo, 1996.
- Almenar, R. (1993) Cap una Societat Sostenible. *Medi Ambient. Tecnologia y Cultura*. Barcelona: GenCat. Departament de Medi Ambient. 6: 24.
- ANAPE. (2003) *Aplicaciones de Envasado y Embalado en EPS*. [en línea]. URL <<http://anape.es>>. [visita del 11 de agosto del 2003].
- ANAPE. (2003) *El poliestireno expandido y el medio ambiente*. Madrid: ANAPE. p: 10. Boletín 10: 3.
- ANAPE. (2004) *Boletín de EPS*. Madrid: ANAPE. Boletín 15: 1. (septiembre 2004).
- ANAPE. (2004) Asociación Nacional del Plástico Expandido. Estadísticas del sector. *Fichero ANAPE. EPS*. Información técnica:1, 2, 3.1. Sector EPS 4. Madrid: ANAPE.
- ANARPLA. (1999) *Estudio Técnico Comercial para la Difusión y Fomento del Uso y Aplicaciones de la Granza Reciclada de Plásticos*. Valencia: ANARPLA.
- Andrews, H. (1997) *Gypsum and anhydrite plasters*.
- Asiedu, Y.; Gu, P. (1998) *Product life cycle cost analysis: state of the art review*. International Journal of Production Research.
- Asti, P. (1997) *Il gesso rivestito. Manuale di progettazione e di posa*. Milano: BE-MA editrice.
- ASTM. (1990) *Standard Guide. The Development of Standards Relating to the Proper Use of RecyclingPlastics*. Philadelphia: Society for Testing and Materials. Designation D 5033-90.
- APME. (2002) *An analysis of plastics consumption and recovery in western Europe 2000*. Bruselas: APME.
- APME. (2005) Association of Plastics Manufacturers Europe. *Plastics in Europe 2002 & 2003*. Brussels: APME. [visita del 28 de mayo del 2005].
- APME. (1992) *Fire behaviour of expanded polystyrene EPS foam*. Bruselas: APME.
- Arredondo y Verdú, F. (1991) *Yesos y cales*. Madrid: E.T.S. Ing. de caminos.
- Arredondo, F. (1980) *Estudio de materiales. Las rocas en la construcción*. Vol. II. El yeso. Madrid.
- Baesa de Loño, J. (sep.1996) La gestión Integrada de Residuos Sólidos Urbanos. *Revista Plásticos Universales*. Munich: Hanser.

- Barnetson, A. (2004). *Desarrollo sostenible. Reciclado de EPS en Europa*. Boletín EPS. Madrid: ANAPE. Septiembre del 2004:4.
- BASF. (2003) *Recycling and disposal use of expanded styropor*. [en línea] URL <<http://www.basf.com>>. Technical Bulletin. TI-0/2-810. [visita del 12 de agosto de 2003].
- Becherer, G.; Fiedler, H. (1979) *Silikatechnik 6*. (1955). Citado por Gomá, F. en: El cemento Pórtland y otros conglomerantes. 1979.
- Berkel, R. et al (1997) *Application of an industrial ecology toolbox for the introduction of industrial ecology in enterprises*. Journal Cleaner Production.
- Bifani, P (1999) *Medio Ambiente y desarrollo sostenible*. Madrid: Iepala.
- Billatos, B.; Basaly, A. (1997) *Green technology and design for the environment*. Washington: Taylor & Francis.
- Bisio, A. L; Xantos, M. (1995) *HOW TO MANAGE PLASTICS WASTE*. Munich: Hanser.
- Brandrup, J. et al. (1996) "Hydrogenation". "Low temperature pyrolysis for feedstock preparation". "Properties and uses of recycled, expanded polystyrene". *Recycling and Recovery of Plastics*. Munich: Hanser.
- Boada, M; Zahonero, A. (1998) *Medi Ambient una crisi civiltzadora*. Madrid: La magraña. p: 170, 172.
- BOE No.96 (1998) *Ley 10/98 ,de 11 de noviembre. de residuos*. España: BOE 96, de 22-4-98.
- BOE. NBE-CT-79 (1997) *Condiciones térmicas en los edificios*. Real decreto 2429/79. Madrid: Ediciones del autor técnico. 1997.
- BOE. RY85 (1985) *Pliego General de condiciones para la recepción de yesos y escayolas para las obras de construcción (RY85)*. Presidencia de Gobierno. Orden Ministerial del 31 de mayo de 1985. B.O.E. del 10 de junio de 1985. p: 1365-1366.
- Boothroyd Dewhurst, Inc & TNO. (1996) *Design for Environment, User Guide*.
- Bovea, M. (2002) *Valoración de productos Ecológicos*. Aplicación al diseño de mobiliario de oficina. Directora: Vidal, R. Tesis doctoral, Departamento de Tecnología, Universitat Jaume I.
- Burg, H. J.; et al. (1977) *El yeso en España y sus aplicaciones en la construcción*. Madrid: Asociación de investigaciones en la construcción. Tomo I:33.
- Calvo, R. (2004) Comunicación personal. Director de la planta Kanuf. Guixers, Solsona, Lleida. Visita a la planta del 9 marzo 2004.
- Carson, R. (2002) *Silent Spring*. Boston: Houghton Mifflin.
- Cavanillas, J. (abril 2002) Los plásticos, esos materiales... *Revista de Plásticos Modernos*. p: 424.

- Cavazzi, A. (1979) *El sulfato cálcico gelatinoso y el fraguado del yeso*. Kollid-Ziecher. 11-1912. Citado por Gomá, F. 1979.
- Coburn, A.; et al. (1989) *Gypsum Plaster. Its manufacture and use*. London: Intermediate Technology Publications.
- Çolak, Adnan. (2000) Density and strenght characteristics of foamed gypsum. *Cement and Concrete Composites*. USA: Elsevier Ltd. 22:193-200.
- Costas, J. (1970) *Manual del yeso estucado*. p: 31-33
- Cucurull, D.; et al. (1998) Residus I Medi Ambient. *Medi Ambient i Tecnologia*. Barcelona: UPC. p: 187-199.
- Cusa, J. (1979) *Aplicaciones del plástico en la construcción*. Barcelona: CEAC.
- De Grave, I. (1981) Poliestireno expandible. *Revista de Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 2:76.
- De la Fuente, H.(1997) *Gestión medioambiental adecuada de residuos sólidos*. Santiago de Chile: CEPAL/GTZ. p: 282.
- De la Fuente, H. (1997) Minimización de Residuos y Tecnología. *Gestión Ambientalmente Adecuada de Residuos Sólidos*. Santiago de Chile: CEPAL/GTZ. p: 281.
- Del Alamo, L.; et al. (1998) Sistemas de Gestió Ambiental. *Medi Ambient i Tecnologia*. Barcelona: UPC. p: 21.
- Derry, W. (1984) *La Historia de la Tecnología*. México: SIGLO XXI.
- Diccionari de Gestió Ambiental. (1997) Centre de terminología. *Diccionari de Gestió Ambiental*. 1ª ed. Barcelona: Enciclopedia Catalana. p: 190.
- Dietz, A. G. (1973) *Plastics for Architects and builders*. USA: The Massachusetts Institute of Technology. MIT PRESS.
- Docharan, M. F. (1984) *Instalación continua y rotatoria para la fabricación de placas y bloques de yeso y escayola con cámaras de secado*. Madrid. Patente Española 537655. Registro de la propiedad industrial.
- Duriev, (2001) Citado por Villanueva, L. en Manual del yeso. ATEDY. 2001.
- Ecomelt technique. (2003) *The features of "Ecomelt solvent" for Ecomelts technique*. [en línea] URL <<http://www.eco-m.net/feature.htm>>. [visita del 21 de junio del 2003].
- Ehrig, R. (ed). (1992) Mackey, G. et.al. *Plastics Reciclyng.Products and Processes*. Munich: Hanser.
- Elrich, Paul. (1971) *The Population Bomb*. New York: Buccaneer Books, Inc.
- EPSASA (2003) Expanded Polystyrene Associati6n of South Africa. *Selection Guide Introducing Expanded Polystyrene (EPS)* [en línea] URL<<http://www.aaamsa.com>> [visita del 7 de mayo y del 15 de agosto del 2003].

- Espeso, J.; Pérez, E. (2002) El poliestireno expandido, aplicaciones en la construcción. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid: CSIC. 84(588).
- EUMEPS. (2005) *European Manufacturers to Expanded polystyrene*. [En línea] URL <<http://www.eumeps.org>> [visita del 8 de abril 2005].
- Fiestas, E. (2003) Gerente de la empresa Brafim, S. A. (Cerdanyola). Comunicaciones vía e-mail. Noviembre del 2003.
- Ferrer, J.; et al. (2000) *Metodología para la Generación de Alternativas a la Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos*. Alicante: Fundación Dávalos-Fletcher. p: 23-38.
- Gárate, R. I. (1999) *Arte de los yesos, yeserías y estucos*. Madrid: Munilla-Lería.
- Gentle C.R., Lacey M.R.(1999). *Design of a novel insulated construction material. Materials and Design*. UK: Elsevier Ltd. 20: 311 – 315.
- Gerstakis, J.; et al. (1997) *A guide to eco-re-design-improving the environmental performance of manufactured products*. Centre for Design RMIT.
- Graedel, E; Allenby, R. (1996) *Desing for environment*. New Jersey: ATT; Prentice Hall.
- Gnauck/Frundt. (1992) *Iniciación a la química de los plásticos*. Barcelona: Hanser.
- Gomá, F. (1979) *El cemento Pórtland y otros aglomerantes*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Goodship, V. (2001) *Introduction to plastic recycling*. Warwick University: Rapra Technology.
- González, F. (2001) *Plásticos para diseñadores*. México: U de G. p: 173.
- Gordon, J. E. (2002) *La nueva ciencia de los Materiales*. Edición 2000. Madrid: Celeste ediciones.
- Haselein, R.; et al (2002) *FABRICAÇÃO DE CHAPAS DE PARTICULAS AGLOMERADAS USANDO GESSO COMO MATERIAL CIMENTANTE*. *Ciência Forestal*, V.12, n.1, 2002. p: 81-87
- Heck, F. (1982) La transformación del poliestireno expandible (EPS). *Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 4: 214.
- Hernández, F.; et al.(1999) Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*. Madrid: Elsevier Ltd. 13:179-186
- Hornberger, L. (2001) *Expanded polystyrene and polystyrene processing*. [en línea] Santa Clara University. URL <<http://wbtest.engr.ecu.edu/pseps.htm>> p: 2
- Horcajada, S. D. (2005) El EPS en el envase y embalaje: El material, sus aplicaciones y radiografía del sector en España y Europa. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid: CSIC. 89 (584): 142. (febrero 2005).

- Hummel, R. L. (1966) Fisher. Structural building panels with expanded polystyrene cores. The design and structural applications of urethane-cored sandwich panels. *Plastics in building structures*. London: Pergamon Press. p: 243 y 267.
- IGME (2004) Recursos Minerales, riesgos Geológicos y Geoambiente. [en línea] <<http://www.igme.es>> [visita del 15 de diciembre del 2004].
- International EPS Aliance. (2003) [en línea]. URL <<http://www.esprecycling.org>>. [visita del 12 de agosto del 2003].
- Jobbins, R. (2002) *Composiciones de yeso de bajo peso*. España, patente de invención ES 2 178 407 T3. 2001-01-03.
- KBM. (2003) *Products. Styrometer*. [en línea] URL <<http://www.kbm.dk>> [visita del 14 de agosto del 2003].
- Khedari, J.; et al. (2001) New lightweight composite constructions materials with low thermal conductivity. *Cement & Concrete Composities*. Thailand: Elsevier Ltd. 27: 41-47.
- Keoleian, G. (1994) *Product Life Cycle Assessment to Reduce Health Risks and Environmental Impacts*. New Jersey: Noyes Publications.
- Klempner, D.; Frisch, K. (ed). (1994). *Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology*. Munich: Hanser Publishers.
- KNAUF. (2004) *Tipos de placas de yeso marca Knauf*. [en línea]. URL <<http://knauf.es/pys/placasyeso.asp#1>>. [visita abril del 2004].
- KNAUF. (2004) *Catálogo de productos Knauf. Instalaciones en seco*.
- Kumar, Sunil. (2002) A perspective study of fly ash-lime-gypsum briks and hollow blocks for low cost housing development. *Construction and Building Materials*. India: Elsevier Science Ltd. 16: 519-525.
- Lacosta, J. (1992) Características y ensayos físicos de espumas poliméricas. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid. (435): septiembre 2002.
- Lade, K. (1960) *Yesería y estuco*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Laffarga, J.; Olivares, M. (1995) *Materiales de construcción*. Sevilla: Ed EDITAN.
- Larrauri, E.; García, M. (1997) “*Tecnologías de Reciclaje y tratamiento de residuos*”. Memorias. Bilbao: V Congreso de Ingeniería Ambiental.
- Larrauri, E.; et al. (1997) Identificación y separación de polímeros y plásticos procedentes de residuos sólidos urbanos para su reciclado. *Revista Residuos*. 36: 71-77.
- Laukaitis, A. et al. (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement & Concrete Composites*. Lithuania: Elsevier Ltd. Institute of thermal Insulation. 27: 41 – 47.
- Le Chatelier H. (1979) *Experimental researches in construction of hydraulic mortars*. 1919 Faraday Society. Citado por Gomá, F. 1979 en: El cemento Pórtland y otros aglomerantes.

- Leidner, J. (1981) *Plastics Waste*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- López, C. (2004) Poliestireno expandido. EPS en la construcción. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid. 572:126.
- Lund, H. (1996) *Plásticos. Manual Mc Graw Hill del Reciclaje*. Pearson, W. New York: Mc Graw Hill.
- Martínez, O. F. (1972) *Molde perfeccionado para la fabricación de placas de yeso*. Patente Española ES 171188. Registro de la propiedad industrial. Madrid.
- Mayne, N. (2002) "The current status and future prospects of plastics recovery technologies in Europe". Conferencia. APME. Velke Losiny. p:1-4.
- Meadows, D; et al. (1972) *Los límites del crecimiento*. México: Fondo de Cultura Económica
- Milgrom, J. (1992) Polyethylene Tereftalato (PET). *Plastics Recycling*. Ehrig, R. (ed). Munich: Hanser.
- Milgrom, J. (1972) *Incentives for Recycling and Reuse of Plastics*. Report EPA-S41C-72. Cambridge: Little, Inc.
- Modern Plastics Enciclopedia. (2002) (*Enciclopedia de Plásticos Modernos*). New York: Mc Graw Hill.
- Murakami, O. (2001) Technology for Recycling Plastics Materials. [en línea]. URL <<http://global.mitsubishielectric.com>> [visita del 14 de marzo del 2003].
- Murat y Focult. (ed). (1976) *Actas del coloquio de RILEM sobre yeso*. RILEM COMMISSION 23 GP. Saint Remy les Chevrouse. Citado por Villanueva 2001, en Manual del yeso. Madrid: ATEDY.
- Navichandra, D. (1991) "Desing for environment", *Design Theory and Methodology*. ASME.
- Novo de Miguel, L. (1970) *El yeso en la construcción*. Barcelona: CEAC.
- Nuefert, E. (1970) *Manual del Styropor*. Barcelona: Herder. p: 006.
- Oikos green buiding source. (2003) *Quad-lock building systems*. [En línea] URL <<http://oikos.com/products/thermal/quad-lock/index.html>> [Visita del 15 de agosto del 2003].
- Olson Donald. (2002) Gypsum. *US GEOLOGICAL SURVEY MINERAL YEARBOOK*. Washington D. C.: USG S PRESS. p: 35.1.
- Pladur (2003) *Tipos de placas de yeso comerciales*. Catálogo. www.uralita.com [vista del 15 de octubre del 2003].
- Pladur (2005) *Catálogo de placas de yeso laminado PLADUR*. www.uralita.com [vista mayo del 2005].
- Plans i Comella. J. (2004, 4 febrero) Visita a la empresa Knauf fabricante de placas de yeso laminado. Guixers (Solsona), Lleida. Entrevista personal.

- Plásticos Universales (1986) Bloques de esponjado rígido de EPS como infraestructura para la transmisión de cargas en la construcción de carreteras. *Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 30: 182.
- Poyner, R.; Simon, M. (1995) *Integration of DFE tools with product development* Design for Environment Research Group, Department of Mechanical Eng. Manchester Metropolitan University.
- Pujol, T. (2002) Johannesburg 2002. La Címera mundial sobre el desarrollo sostenible. *Revista DCIDOB*. Barcelona: DCIDOB. Tardor: 13, 14.
- Reyes, M. et al. (2002) *Los plásticos como materiales de construcción*. Madrid: UNED.
- Rieradevall, J.; Vinyets, J. (1999) *Ecodisseny i ecoproductes*. Barcelona: Rubes Editorial,S.L. 1a. ed.
- Riethues, M. (1991) El poliestireno expandible. *Revista de Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 10:65.
- Rigola, M. (1998) *Producció + Neta*. Barcelona: Rubes. p: 12.
- Río, M.; et al. (2002) *Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para construcción*. España, patente de invención ES2170612A1, 2002-08-01. Madrid: OEPM
- Roskill Information Service Ltd. (2000) *The Economics of gypsum and anhydrite*. (8th. Edition). London.
- Runi compactors. (2003) APS. [en línea]. URL <<http://www.runi.dk>>. [visita del 13 de agosto del 2003].
- Saechtling, H. (1978) *Los plásticos en la construcción*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Sayil, B.; Gurdal, E. (1999) *The physical properties of polystyrene aggregated gypsum blocks*. Eighth International Conference on Durability of building materials and components. Vancouver, Canada: Institute for research in Construction. 30 May-3 June 1999. pp: 496-504. 1999.
- Santolino, S. (1987) Materiales poliméricos en la construcción. Materiales aislantes. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid: CSIC. 372: 769. junio, 1987.
- Sartorius, I. (2000) *Development of Plastics Manufacturing in Europe*. Trieste: APME.
- Serrano, D. (2001) Reciclado Químico de Plásticos. *Revista de Plásticos Modernos*. Madrid: CSIC. 82(542): 155-161.
- Shalles, H. (1998) Recuperación de desperdicios de material plástico. *Revista Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 32: 88-92.
- Simon, M. (1996) *Product Design for Sustainable Development*, Design for Environment Research Group, Department of Mechanical Eng. Manchester Metropolitan University, 1996.
- Singh, M.; Mridul, G. (1995) Relationship between mechanical properties and porosity of water resistant gypsum binder. *Cement & Concrete Research*. USA: Elsevier Ltd. 26(3): 449-456.

- SPI. (1992) *Guide for Standard Worldwide Terminology for use in recycling of plastics*. The Society of Plastics Industry, Inc. reproducida por ANARPLA (1999) *Estudio Técnico-Comercial para la difusión y fomento del uso de la granza reciclada de plástico*. Valencia: ANARPLA.
- Tamames, R.; Huerta, B. (2003) *Estructura Económica Internacional*. Madrid: Alianza.
- Tchobanoglous, G. (1994) *Gestión Integral de los residuos sólidos*. Madrid: Mc Graw Hill. p: 7-24.
- Tepper, H. (2003) Documento de antecedentes para la Normalización Europea del EPS. *Libro Blanco del EPS*. European Manufacturers of EPS. Traducción de ANAPE. Madrid.
- Torres, M. (2002) ¿Que hacemos con el EPS?. *Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 74:44.
- Torres, M. (2002) Opciones para el tratamiento de residuos de EPS. *Plásticos Universales*. Interempresas. Madrid: PlasUnivers. (marzo 2002).
- UNO, Agenda 21 (1992) *The earth Summit Strategy to Save our planet*. p: 31, 32.
- Villanueva, L.; García, A. (2001) *Manual del yeso*. Madrid: Asociación Técnica Empresarial del Yeso ATEDY.
- WASTE EXCHANGE. (2003) *Waste exchange Service*. [en línea]. URL <<http://www.wasteexchange.com.uk>> [Visita del 13 de agosto del 2003].
- Wehinger, R. (1980) *Caja de moldeo para maquinado de moldeo y colada de yeso para la fabricación de placas de yeso*. Patente Española ES 245644. Registro de la propiedad industrial. Madrid.
- Wirshing, V. (1996) *Calcium Sulfate*. 5a edición. Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol A4. Edition Weinheim. 1985. Traducción Díaz Reyes: ATEDY
- Wytze, G. H.; et al. (junio, 1999) *Plástico PVC, la amenaza de sus residuos*. Madrid: Greenpeace. p: 56.
- Xercanvis, J; et al. (1998) *Sostenibilitat, globalizació i medi ambient. Medi ambient i Tecnologia*. Barcelona: UPC

A

ANEXO

1

EL POLIESTIRENO EXPANDIDO



El Poliestireno Expandido (EPS)

A1

Anexo A1 EL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

A1.1 ORIGEN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

Los orígenes del poliestireno expandido son motivo de discusión entre los investigadores aunque se asegura que pueden ser rastreados hasta mediados del siglo XIX. Sin embargo una patente fechada en Inglaterra en 1911 describe a esta resina, y su aparición comercial se da en 1930 por parte de la empresa alemana I.G. Farben. El concepto original de poliestireno celular fue publicado por los inventores suizos C. Munters y J. Tandberg quienes presentaron la patente 2,023,204 el 3 de diciembre de 1935. En los Estados Unidos de América su producción comienza en 1938. En 1941 la Dow Chemical Company comenzó sus investigaciones para el posterior desarrollo del poliestireno celular. Este proceso en bloque conocido como "proceso de torre" consiste en la mezcla de poliestireno y un compuesto de bajo punto de ebullición como el butileno o metilclorado, en una torre alta con una subsiguiente expansión de cuerpos largos de espuma que son posteriormente cortados. Este material denominado STYROFOAM® (marca registrada de la Dow Chemical) fue usado como material flotador durante la segunda guerra mundial por el ejército de los E.U.A. [EHRIG92].

EL poliestireno expandido se presentó el 28 de febrero de 1950 a nombre de la compañía alemana BASF y sus inventores fueron el Dr. Fritz Stastny y Karl Buchholz, investigadores de los laboratorios de la empresa en Ludwigshafen. En años posteriores se desarrollarían diversos métodos para la obtención de perlas y su transformación en productos [ESPES82].

Después de la segunda guerra mundial se encontraron nuevos usos para este material, especialmente como aislante y en decoración. Se desarrolló un proceso que permitió la extrusión continua de la espuma. También otras espumas fueron desarrolladas con este plástico entre finales de los años cincuentas y principios de los sesentas, como fueron las espumas moldeadas de estireno expandido, lámina de poliestireno expandido y cuerpos pequeños de poliestireno expandido (loose-fill) para embalaje.

El poliestireno (PS) es considerado por muchos el material plástico estándar por excelencia debido a sus características de dureza y rigidez, propiedades dieléctricas, disposición para ser transformado con facilidad, y a aceptar aditivos, además de su bajo costo comparado con otras resinas similares.

Son cuatro los principales segmentos de mercado del PS: los sólidos inyectados, los sólidos extruídos, la espuma extruída y la espuma expandida. De ellos se desprenden una gran cantidad de usos finales presentes en prácticamente cualquier campo de la industria.

El poliestireno expandido, EPS por sus siglas en inglés Expanded Polystyrene, es un material plástico celular rígido fabricado a partir del moldeo de perlas de poliestireno expandible que presenta una estructura celular cerrada rellena de aire. El EPS se conoce por toda una serie de nombres comunes como corcho blanco, *suro blanc*, o por sus nombres comerciales Porexpan® o Styropor®. [HORCA05]

Un plástico celular se define como un plástico cuya densidad aparente ha decrecido sustancialmente por la presencia de numerosas celdillas dispuestas dentro de su masa. En este escrito, los términos "polímero celular", "plástico espumado", "plástico expandido" y "espuma plástica" se usan de forma indistinta para denotar a los sistemas de dos fases sólido-gas, en el cual el sólido es continuo y compuesto de un polímero sintético o hule. La fase gaseosa en un polímero celular es usualmente distribuida en vacíos o bolsas llamadas

celdillas. Si estas celdillas se interconectan, el material es llamado de "celdillas abiertas". Si estas celdillas son discretas y la fase gaseosa de cada una es independiente de otras celdillas, es un material de "celdillas cerradas". Este es el caso de la espuma de EPS [KLEMP94].

A1.2 PROCESOS DE OBTENCIÓN DE PS

El poliestireno expandible o poliestireno cristal es la materia prima para fabricar artículos acabados en poliestireno expandido. Al igual que la gran mayoría de los plásticos industriales el EPS se deriva del petróleo y específicamente del poliestireno (PS).

El PS es un termoplástico aromático, claro y quebradizo. El proceso de fabricación del EPS no varía la naturaleza química del PS, que son cadenas poliméricas de monómeros de estireno de fórmula molecular $-(C_8H_8)_n-$.

Los dos métodos comunes para la polimerización de PS son los de suspensión y masa continua. El proceso de suspensión utiliza un reactor con agitación donde se introduce el monómero disperso en agua y agentes de suspensión que mantienen disperso al monómero en la fase de agua. Se usan iniciadores de radical libre tanto para acelerar la reacción como para determinar el peso molecular del producto. Posteriormente el plástico que resulta es acondicionado y extruído.

El método de masa continua conduce al monómero a través de diversos intercambiadores de calor, hasta que se convierte en un polímero de ciertas características de solidez. El monómero que no reaccionó es puesto nuevamente al inicio del proceso.

Ehrig [1992] señala que las técnicas de suspensión ofrecen un producto más versátil mientras que el de masa continua resulta en una operación de mayor eficiencia.

Para obtener poliestireno expandible se realiza una polimerización radical en suspensión de agua. Al monoestireno se le agrega antes o durante la polimerización una fracción de benzina de bajo punto de ebullición, que se compone principalmente de n-pentano y de iso-pentano como agentes expansores. A éstos se les considera los agentes típicos presentes en la reacción, aunque también se usan otros hidrocarburos de bajo peso molecular con cadenas entre 3 y 6 átomos de carbono como el butano, el isobutano, el neopentano, el hexano y sus mezclas [ESPES82].

La reacción se produce en reactores de acero inoxidable agitados mecánicamente y con temperaturas controladas mediante camisas de refrigeración-calefacción.

Durante el proceso se agregan diversos aditivos como:

- Controladores de expansión. Permiten disminuir el efecto de posibles impurezas presentes en el monómero. Generalmente son hidrocarburos con puntos de ebullición entre 70 y 170 °C.
- Catalizadores. Estos pueden ser peróxidos de dibenzolio y dicumilo y perbenzoatos como el tertbutilo o mezclas de ellos.
- Estabilizantes de suspensión. De gran importancia durante la agitación, los más empleados son coloides moleculares tipo polialcohol vinílico.
- Aditivos modificadores. Dependiendo del segmento de mercado al que se dirija el producto estos pueden ser retardantes o inhibidores de llama, que son adiciones de compuestos de bromo como el hexabromociclododecano, el dibromopropil y la cloroparafina. Otros aditivos son los colorantes y los hidrofobizantes. También se

agregan aditivos que permiten mejorar el proceso de producción como los que favorecen el desmoldeo y la adhesión en la preexpansión.

Junto al EPS convencional y al preparado para inhibir las llamas, también se ofrecen en el mercado “tipos especiales” que requieren el uso de copolímeros. El copolímero de estireno-acrilonitrilo permite desarrollar materiales esponjados con una mayor resistencia a aceites. Otros como los copolímeros de estireno-anhídrido del ácido maléico resisten más a la temperatura. También hay que considerar los materiales teñidos en masa y las preparaciones especiales para embalaje suelto (en inglés: loose fill) [DEGRA81].

Al término del proceso de polimerización las pequeñas esferas que resultan son secadas por medio de aire frío y centrifugación para después ser separadas por tamaño a través de tamices (cribado). Posteriormente las perlas se aditivan, generalmente con estearatos, para mejorar su transformación. Después de un almacenamiento intermedio en silos, la materia prima se envasa en contenedores de cartón recubiertos en su interior por un film plástico o también se envasan en contenedores metálicos. El producto se conserva a una temperatura inferior a 20° C, para evitar que el agente expansor se volatilice. [HORCA05].

No hay acuerdo entre los autores acerca de los tamaños de perlas que se obtienen; Espeso [2002] señala un rango que va de los 0,5 hasta los 4 mm, Heck [1982] 2,5 mm, De Grave [1981] de 0,4 a 2mm y más y la ANAPE [2004] marca un intervalo que va de 0,2 a 3mm de diámetro.

Aunque depende del fabricante, el uso de un cierto tamaño de perlas para un fin específico se puede hacer una clasificación así:

Tabla A1.1 Tamaño de las perlas de EPS típicas y sus aplicaciones

Tamaño de la perla	Aplicación
0,2 a 0,4 mm	Piezas moldeadas de paredes muy delgadas
0,4 a 0,7 mm	Piezas moldeadas de paredes delgadas
0,7 a 1 mm	Piezas moldeadas de pared gruesa y placas para aislamiento térmico con densidad alta
1 a 2 mm	Placas de aislamiento térmico y para amortización de ruido
+ de 2 mm	Placas de aislamiento térmico

Fuente: De Grave, I. (1981) Poliestireno expandido. *Revista Plásticos Universales*. Munich: Hanser. 2:76.

Cuando la perla está lista para su moldeo ha de recibir un cuidadoso manejo, ya que es muy sensible a la temperatura del lugar donde se almacena y un descuido puede provocar la migración del agente expansor del interior de las esferas hacia la atmósfera.

A1.3 EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

La materia prima del EPS son pequeñas perlas de poliestireno que contienen al interior de las mismas agentes de expansión, que a simple vista se asemejan al azúcar de uso doméstico inusualmente gruesa. Las perlas de PS son esferas con diámetros que van de 0,2 a 3 milímetros. Estos pequeños cuerpos pueden recibir tratamientos con aditivos para cumplir

demandas de comportamientos particulares, como son aquellos que inhiben el desarrollo de llamas o PS “difícilmente inflamables” como los llama F. Heck [HECK82]. Para obtener perlas de PS se utiliza un método químico, a diferencia de la transformación de EPS donde sólo intervienen medios físicos.

Los gránulos de EPS listos para ser convertidos en productos se transforman en bloques, placas y objetos moldeados mediante procesos de una o tres etapas:

- **Proceso de una etapa.** La materia prima es expandida directamente sin esponjado previo. El proceso puede realizarse de forma continua o discontinua donde se obtienen densidades aparentes mínimas que van de 10 a 14 kg/m³. Esta técnica no ha tenido el mismo éxito que la de varios etapas, ya que la última permite más y mejores producciones [DEGRA81].
- **Proceso de tres etapas:**

Primera etapa. Preexpansión.

La materia prima se calienta por medio de vapor de agua a una temperatura aproximada entre 80 y 110°C, en unas instalaciones especiales denominadas preexpansores. Esto con el fin de provocar un hinchamiento de las perlas que pueden ir hasta 40 veces su tamaño original, lo que depende de la duración de la expansión y de la temperatura. Así la densidad aparente del material pasa de 630 kg/m³ a otras que van de 10 a 30 kg/m³. Las perlas de material compacto han pasado a ser esferas de plástico celular con celdillas en su interior.

Segunda etapa. Reposo intermedio.

Después del importante aumento de volumen que se dio durante la preexpansión el sistema demanda estabilizarse. Al salir de la etapa anterior y entrar en contacto con la temperatura ambiente, la capa exterior de la perla se enfría rápidamente, el pentano se comprime y el vapor de agua en el interior de las perlas se condensa; todo ello genera un espacio vacío que es preciso compensar con la penetración de aire por difusión y así lograr una mayor estabilidad mecánica y mejorar su capacidad de expansión.

Para lograr que las presiones internas y externas se igualen se dejan las perlas ya preexpandidas en recipientes aireados, por un tiempo que permita que el aire se difunda por la pared externa de la esfera, lo que compensa los vacíos interiores. Esto también permite la salida de agua retenida y de una parte de agente expansor. Una vez estabilizadas, las perlas guardan una porción del agente expansor el cual es necesario en la siguiente etapa para concluir el proceso.

Tercera etapa. Expansión y Moldeo.

Las perlas preexpandidas y estabilizadas son depositadas en moldes cerrados. Se realiza una nueva aportación de calor mediante la inyección de vapor de agua lo que provoca una dilatación del agente expansor remanente y una nueva hinchazón de la esfera, al tiempo que ésta reblandece. Al estar confinadas las perlas tienden a ocupar los espacios entre ellas y al entrar en contacto se sueldan unas a otras con cierta fuerza. Esto forma un cuerpo sólido con una forma deseada, compacta y estable. Posteriormente el molde aún cerrado es refrigerado con agua corriente para detener la expansión y favorecer el desmoldeo. La pieza ahora es sometida a un proceso de vacío que extrae el exceso de agua que aún pueda contener para finalmente ser retirada.

Dependiendo de las características del producto, la duración de este proceso puede ir de 1 a 5 minutos [ESPES82].

El moldeo final se realiza casi de forma generalizada con vapor de agua debido a que sigue siendo el mejor portador de calor aunque también se puede utilizar para el moldeo agua caliente, corrientes de alta frecuencia o calor de radiación. Sin embargo estos medios aún no son tan rentables como el vapor de agua por lo cual no se espera un cambio drástico a corto plazo en el proceso [HECK82].

Las formas que resultan de la etapa de moldeo se agrupan en dos tipos: uno, productos acabados y dos, bloques para mecanizado.

a. Productos acabados

Estas piezas están prácticamente listas para su uso final desde el momento que son botadas del molde. Muestran una geometría específica para la función que han de cumplir. Su producción ha de ser muy numerosa para hacerla rentable, ya que involucra el desarrollo de moldes metálicos de alta precisión y alto costo.

b. Bloques para mecanizado

Son generalmente bloques de grandes dimensiones (pueden llegar a sobrepasar los 10 m³) y con formas prismáticas. De este cuerpo se extraen mediante procesos de mecanizado los productos que se demandan. Hay dos maneras para lograr el moldeo: la primera es usando sistemas de hilos-resistencia que están diseñadas para generar altas temperaturas y que al pasar por el bloque de EPS le cortan en forma precisa y limpia. El equipo utilizado en esta parte de la industria puede ir desde el manual para producciones artesanales, hasta maquinaria completamente automatizada que permite notable precisión de corte y altos volúmenes de producción. La segunda forma de maquinado involucra el uso de sierra de cinta, cuchillas, fresadora y otros instrumentos de corte. Las herramientas pueden ser de uso general o mostrar formas particulares a la pieza a obtener. Esta técnica permite obtener productos de cierta complejidad partiendo de bloques de formas simples [ANAPE02]. Igual que en el caso del mecanizado con hilo-resistencia, el mecanizado con herramientas de corte ofrece toda una gama de posibilidades que van desde las manuales que dependen de la habilidad del usuario hasta las completamente mecanizadas y guiadas por ordenador.

A1.4 PROPIEDADES DEL EPS

A1.4.1 Propiedades físicas

A1.4.1.1 Densidad

Los productos fabricados con poliestireno expandido se muestran como materiales espumados de gran ligereza. Dependiendo de la aplicación del EPS, sus densidades varían entre 10 kg/m³ hasta los 50 kg/m³. Los tipos normalizados de EPS según la norma UNE 92,110. Son también los usuales en el mercado y se muestran a continuación:

Tabla A1.2 Densidades aparentes de EPS comerciales

Tipo	Densidad (kg/m ³)	
	Mínima	Nominal
I	9	10
II	11	12
III	13,5	15
IV	18	20
V	22,5	25
VI	27	30
VII	31,5	35

Fuente: ANAPE. (2003). Propiedades del poliestireno expandido. Madrid: ANAPE

A1.4.1.2 Resistencia mecánica

Espeso y García [2002] señalan que una propiedad de gran importancia en los materiales de EPS es su estabilidad mecánica. Esto demanda una atención constante al hecho de que aunque se les considere espumas rígidas su comportamiento viscoelástico no es igual al de un plástico sólido y rígido. ANAPE por su parte dice que para ser evaluada la resistencia mecánica de los EPS hay que atender cuatro características [ANAPE03].

- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la flexión
- Resistencia a la tracción y por último
- Resistencia a la cizalladura o al esfuerzo cortante

Destacan entre estos elementos los valores aquellos de la resistencia a la compresión los cuales están directamente relacionados con la densidad del material aunque no son ajenos a factores como la forma de la celdilla, el tiempo en uso y la temperatura en la que se realiza la prueba. Esto resulta claro si pensamos que al aumentar la densidad del material, aumenta el grosor de las paredes de las celdillas dentro de las perlas lo que permite reportar mayor resistencia a la compresión.

El aumento paralelo de la resistencia a la compresión con el aumento en la densidad del material y el módulo de la elasticidad, resultan del cociente entre el valor de la resistencia a la compresión en zona elástica y su deformación.

A1.4.1.3 Tensión de compresión

Esta propiedad se requiere en los productos de EPS usados principalmente como elementos arquitectónicos, esto es sometidos a carga como suelos, cubiertas, aislamiento perimetral de muros, etc. En la práctica la deformación de EPS en estas aplicaciones sometidas a carga es muy inferior al 10%.

Por otro lado la relación entre los resultados de ensayo de tensión de compresión al 10% de deformación y el comportamiento a compresión a largo plazo es bien conocido señala la ANAPE [2003]. Los productos de EPS tienen una deformación por fluencia de compresión del 2% o menos después de 50 años, mientras estén sometidos a una tensión permanente de compresión.

Según la Norma EN 13163:2001 los productos de EPS se dividen en dos tipos. El tipo EPS T tiene propiedades específicas de aislamiento frente al ruido. En el segundo (exceptuando en

EPS S), cada tipo debe satisfacer dos condiciones diferentes al mismo tiempo, las tensión de compresión al 10% de deformación y la resistencia a la flexión.

Tabla A1.3 Clasificación de productos de EPS

Tipo	Tensión de compresión al 10% de deformación kPa	Resistencia a flexión kPa
EPS S	-	50
EPS 30	30	50
EPS 50	50	75
EPS 60	60	100
EPS 70	70	115
EPS 80	80	125
EPS 90	90	135
EPS 100	100	150
EPS 120	120	170
EPS 150	150	200
EPS 200	200	250
EPS 250	250	350
EPS 300	300	450
EPS 350	350	525
EPS 400	400	600
EPS 500	500	750

Fuente: Norma UNE-EN 13163. Productos manufacturados de EPS. Feb. 2002. Anexo C. Madrid: AENOR. p: 33

A1.4.1.4 Propiedades de aislamiento térmico

Resultan notables las propiedades de aislamiento al calor y al frío que muestra el EPS y no es extraño que sea una de sus aplicaciones más comunes. También es una de sus propiedades más exploradas por investigadores y asociaciones interesadas.

Se ha visto que el EPS se construye con una gran cantidad de esferas de poliestireno soldadas unas a otras y que forman una estructura de geometría muy variada. Las perlas contienen aire en su interior de tal manera que son huecas en un 97-98% de su volumen. El aire atrapado dentro de la estructura funciona como un magnífico aislante térmico.

La densidad de una estructura de plástico determina la conductividad térmica del material. El EPS como otras espumas recibe cuatro contribuciones [CASTE00]:

- Conducción en el poliestireno
- Conducción entre el aire atrapado
- Convección por el movimiento de las moléculas de aire
- Radiación a través de las paredes de las celdillas

Se puede afirmar que como en el caso de otros plásticos celulares al disminuir la densidad aparente del material, disminuye la conductividad térmica del mismo. Aunque a densidades aparentes muy bajas, se presenta un aumento de conductividad térmica atribuido al aumento que se produce en la transmisión de calor por el efecto de calor de radiación [KLEMP94] [NEUFE].

A1.4.1.5 Propiedades de aislamiento acústico

Como en otras estructuras poliméricas, la capacidad de aislamiento acústico del EPS depende fundamentalmente de la densidad del poliestireno en la espuma. El EPS absorbe sonido en un rango de frecuencias entre 3500 y 4500 Hz. Para incrementar ese rendimiento el EPS se combina con otros materiales para formar barreras al sonido tipo sándwich ya sea con maderas o bien laminadas de otros plásticos.

Las espumas de EPS están formadas por cuerpos cerrados y soldados entre sí, así que para mejorar sus capacidades de aislamiento acústico conviene favorecer la comunicación de aire entre las celdillas. Con este fin se ha desarrollado un proceso de calandrado sobre placas de EPS convencionales que comprime y rompe capas de la estructura para después permitir la recuperación del material casi por completo a su tamaño original. Por otra parte esta técnica también aporta una disminución notable en la rigidez de la espuma [ESPES82] [AAPE03].

A1.4.1.6 Comportamiento ante el agua

Debido a su amplia aplicación en los campos del embalaje y la construcción el comportamiento del EPS ante el agua es un tema importante.

El EPS es un material hidrofóbico ya que su fase plástica está compuesta de átomos de carbono e hidrógeno en ausencia de grupos polares. No tiene capilaridad alguna y aún sumergido en agua sus niveles de absorción son mínimos, después de 28 días en ensayo su absorción de agua se ubica entre el 1 y 3% [ANAPE03] [AAPE03].

La única oportunidad que tiene el agua de adentrarse hacia el interior de la estructura celular se da cuando las capas exteriores de la pieza presentan pequeños espacios, producto de una soldadura deficiente entre perlas, esto por defectos de moldeo.

El vapor de agua sí puede llegar a difundirse hacia el interior de la estructura cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de temperaturas. El vapor de agua tiende a ir de lugares de alta presión hacia otros lugares donde hay una menor presión. A este movimiento que estudia Neufert [1970] en el EPS se le denomina "difusión" los materiales oponen su "resistencia a la difusión". Cuanto más grande es ésta, menor vapor se difunde dentro de una probeta de material. Así, se puede concluir que el EPS no presenta propiedades de barrera.

A1.4.1.7 Estabilidad dimensional

El EPS como todos los materiales muestra variaciones en sus dimensiones debido a influencias de calor sobre el mismo.

La evaluación sobre las variaciones se miden con el coeficiente de dilatación térmica que en el caso del EPS se maneja de forma independiente a su densidad, aunque investigadores como K.W. Suh reportan diferencias en esta propiedad con respecto a la densidad y la temperatura [KLEMP94].

El coeficiente de dilatación térmica para el EPS con densidades comerciales (tipos I-VII) se ubica en $5 - 7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Esto es entre 0,05 y 0,07 mm por metro de longitud y grado kelvin. ANAPE [2003]. Resulta de importancia atender esta propiedad, en especial en proyectos de grandes dimensiones edificadas donde participa el EPS.

A1.4.1.8 Estabilidad frente a la temperatura

El EPS sufre alteraciones en sus características por la acción de temperatura.

A excepción de las variaciones típicas por contracción, el EPS mantiene sus propiedades a temperaturas consideradas de frío extremo.

Por el otro lado a temperaturas elevadas ANAPE [2003] expresa que el límite superior para aplicaciones "flash" o de corto plazo es de 100°C y de 80°C para usos continuados y con el material sometido a una carga de 20 KPa.

A1.4.1.9 Efectos del medioambiente sobre el EPS

Como en el caso de otros materiales plásticos, las espumas EPS solo se ven afectadas si se exponen a la radiación ultravioleta.

Esta prestación es de especial interés para las aplicaciones relacionadas a la construcción, donde si se expone por largo tiempo, el EPS se degradará en sus capas exteriores mostrando un amarillamiento progresivo. Esto quiere decir que el material se vuelve frágil, lo que promueve su erosión por la lluvia y el viento.

Tabla A1.4 Cuadro resumido de las propiedades físicas del EPS usual en el mercado

Propiedades	Norma UNE	Uds.	Tipos de EPS						
			I	II	III	IV	V	VI	VII
Densidad Nominal	EN-1602	kg/m ³	10	12	15	20	25	30	35
Conductividad Térmica I (10°C)	92201	mW/mK	46	43	39	36	35	34	33
Tensión de compresión al 10% de deformación	EN-826	kPa	30	40	65	100	150	200	250
Resistencia a la flexión	EN-12089	kPa	50	60	100	150	200	275	375
Resistencia a la Tracción	EN-1607 EN-1608	kPa	-	<100	110-290	170-350	320-410	300-480	420-580
Módulo de Elasticidad		kPa	-	<1.5	1.6-5.2	3.4-7.0	5.9-7.2	7.7-9.5	9-10.8
Clase de reacción al fuego	UNE 23727	-	M1 ó M4	M1 ó M4	M1 ó M4	M1 ó M4	M1 ó M4	M1 ó M4	M1 ó M4
Absorción de agua en condiciones de inmersión 7 días	EN-12087	% (vol.)	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5
Absorción de agua en condiciones de inmersión 28 días	EN-12087	% (vol.)	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3

Fuente: ANAPE. *El EPS*. Propiedades físicas del poliestireno expandido. [En línea. 6 agosto 2003]

A1.4.2 Resistencia Química

La fase sólida de la estructura es un polímero no polar así que será atacado por solventes que muestren esta característica.

El EPS sufre de forma muy notoria el ataque de disolventes orgánicos tradicionales como la acetona. Otros disolventes de origen natural como el aguarrás lo atacarán fácilmente (ver cuadro A1.5). Sin embargo el EPS muestra una notoria resistencia a ser atacado por cualquier medio acuoso básicos o ácidos [ANAPE03] [AAPE03].

Tabla A1.5 Cuadro resumido de las propiedades químicas del EPS usual en el mercado

SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD
Solución salina (agua de mar)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Jabones y soluciones de tensioactivos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Lejías	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácido clorhídrico (al 35%), ácido nítrico (al 50%)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos concentrados (sin agua) al 100%	No estable: el EPS se contrae o se disuelve
Soluciones alcalinas	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Disolventes orgánicos (acetona, esterés,..)	No estable: el EPS se contrae o se disuelve
Hidrocarburos alifáticos saturados	No estable: el EPS se contrae o se disuelve
Aceites de parafina, vaselina	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada en su superficie
Aceite de diesel	No estable: se contrae o se disuelve
Carburantes	No estable: se contrae o se disuelve
Alcoholes (etanol y metanol)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Aceites de silicona	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada en su superficie

Fuente: ANAPE. *El EPS*. Propiedades químicas del poliestireno expandido. En línea.

A1.4.3 Propiedades biológicas

El EPS es un material que no se pudre, no enmohece y no se descompone. Tampoco tiene valor nutritivo alguno que fomente el desarrollo de microorganismos. Sin embargo en muchas de sus aplicaciones la estructura resulta impregnada de residuos por lo cual puede convertirse en portador de microorganismos aunque no participe del proceso biológico.

No se ve atacado por las bacterias del suelo. El EPS cumple con las exigencias sanitarias y de seguridad e higiene, no tiene ninguna influencia medioambiental perjudicial, no es peligroso para las aguas. Se puede adjuntar a los residuos domésticos o bien ser incinerados. [ANAPE03].

A1.4.4 Comportamiento al fuego

En mayor o menor medida los plásticos son materiales combustibles si no han sido modificados con aditivos. El EPS está fabricado con polímeros o copolímeros de estireno que contienen como agente expansor un hidrocarburo de bajo punto de ebullición, que en la gran mayoría de las veces es un pentano. Este conjunto es un material combustible que presenta diversos comportamientos.

El proceso de transformación de un producto de EPS deja residuos del agente expansor que requiere de una etapa de almacenamiento para volatilizarse y disminuir la posibilidad de incendio. Como en otros materiales al quemar EPS hay emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua y compuestos volátiles originados por los radicales generados del estireno [ESPES82].

La intensidad del incendio y otras características como su amplitud, desarrollo y duración depende de las propiedades específicas del espumado. En España, de acuerdo con la Norma UNE 23727, las clases son: M0 (material incombustible), M1 (material combustible pero no inflamable) y M2, M3 y M4 que corresponden a materiales combustibles con grado creciente de inflamabilidad [ANAPE 04].

El EPS se clasifica en: M1 grado autoextinguible para poliestireno con aditivos retardantes, y M4 para materiales estándar no aditivados. El EPS M1 o autoextinguible sólo se contraerá al exponerlo a la flama para después arder con llama superficial muy baja.

A aproximadamente 100 °C las estructuras de EPS comienzan a reblandecer y contraer para finalmente fundirse. Si esta masa sigue expuesta al calor, emitirá gases de descomposición inflamables. En ausencia del fuego los productos de descomposición no se inflaman sino hasta alcanzar temperaturas entre 400 y 500 °C (ver gráfica A1.6).

Tabla A1.6 Resumen del comportamiento del EPS a la combustión

Probeta	Componentes de los gases de combustión	Composición del gas de combustión en ppm a una determinada temperatura de ensayo			
		300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Material expandido de producto estándar	Monóxido de carbono	50*	200*	400*	1000*
	Estireno monómero	200	300	500	50
	Otras sustancias aromáticas	Trazas	10	30	10
	Ácido bromhídrico	0	0	0	0
Material expandido de producto autoextinguible	Monóxido de carbono	10*	50*	500*	1000*
	Estireno monómero	50	100	500	50
	Otras sustancias aromáticas	Trazas	20	20	10
	Ácido bromhídrico	10	15	13	11
Madera de Abeto	Monóxido de carbono	400**	6000**	12000**	15000**
	Sustancias aromáticas	-	-	-	300
Planchas aislantes de aglomerados de madera	Monóxido de carbono	14000**	24000**	59000**	69000**
	Sustancias aromáticas	Trazas	300	300	1000

* Combustión sin llama. ** Combustión con llama - No se midió.

Fuente: ANAPE (2004) Propiedades del EPS. *Fichero ANAPE Poliestireno Expandido*. Madrid: ANAPE. Información Técnica 3.2

A

ANEXO

2

PERFIL TÉCNICO DEL YESO



Perfil técnico del yeso

A2

A.2 PERFIL TÉCNICO DEL YESO

A2.1 GENERALIDADES

A2.1.1 Descripción

La palabra “yeso” designa en castellano a varios productos. Por una parte a la piedra natural denominada “aljez” o “piedra de yeso” compuesta químicamente por sulfato de calcio cristalizado y agua, en proporción de una molécula de sulfato por dos de agua; esto es sulfato cálcico dihidratado o de doble hidrato. Por otra parte “yeso” también se entiende por el producto en polvo que se obtiene por calcinación y molienda de la piedra de aljez. El polvo de yeso está compuesto por varias fases semihidratadas o anhidras del sistema sulfato cálcico y agua, que tienen la propiedad al amasarse con agua, de endurecer a través de un proceso físico-químico que se conoce como fraguado y que transforma nuevamente en yeso a la pasta formada por el sulfato cálcico y agua. El material endurecido que resulta del amasado también se le conoce como “rehidrato” o “yeso rehidratado” debido que aunque su composición química es la misma, su estructura física es más porosa. Un término de uso común y de nuestro interés es de “escayola” que designa a un yeso semihidratado de especial pureza, fineza y blancura.

A2.1.2 Naturaleza del yeso

La piedra de aljez o piedra de yeso es la única materia prima para la fabricación del yeso. La piedra puede tener un aspecto completamente cristalino o amorfo y es una roca blanca cuando no esta contaminada. Las variedades de aljez son las siguientes:

- Laminar. Muy pura, dura y transparente.
- Fibrosa. Es una roca muy dura pero de aspecto sedoso.
- Aljez ordinario. Compacta y con poca señas de cristalización.
- Sacaroidea. Similar al azúcar.
- Alabastro. Compacta y translúcida. De bella apariencia y de grano muy fino. Se aprovecha para la fabricación de objetos de decoración así como también aplicaciones utilitarias que demandan buena apariencia como son las odontológicas.

La acción del calor sobre la piedra de aljez produce una serie de transformaciones que permiten la obtención de los diversos tipos de yesos.

A2.1.3 El sistema sulfato cálcico-agua

Este sistema es complejo, donde por medio de deshidratación parcial o total del sulfato cálcico dihidratado ($\text{SO}_4 \text{ Ca} + 2\text{H}_2\text{O}$) se obtienen semihidratos alfa o beta. También con otros sistemas de fabricación se obtienen anhidrita III o anhidrita soluble y anhidrita insoluble o anhidrita II, esta última con tres formas diferentes.

A2.1.3.1 El sulfato cálcico dihidratado

El dihidrato o sulfato cálcico cristalizado con dos moléculas de agua (DH), tiene una microestructura cristalina monoclinica laminar en la que se alternan capas de sulfato cálcico y capas de agua.

El agua se combina en una proporción del 20,92% que alterna con láminas de sulfato cálcico y se une a través de puentes de hidrógeno. Enlaza un oxígeno de un ión sulfato de una capa con un oxígeno de un ión sulfato de la capa adyacente, estando además el oxígeno de la molécula de agua coordinado con un ión cálcico. Resulta en una estructura estable debajo de los 40 °C. Durante el uso del yeso al agregársele agua y amasarse, se logra una rehidratación por fraguado de las fases deshidratadas previamente, lo que nos lleva a obtener de nueva cuenta sulfato cálcico doblemente hidratado, que al ser igual a su estructura de partida pero más poroso y menos denso se le conoce como “rehidrato” (RH).

A2.1.3.2 El sulfato cálcico semihidratado

Se muestra de dos formas: semihidrato alfa ($SH\alpha$) y semihidrato beta ($SH\beta$), ambas con la misma proporción de agua presente en su estructura y que los autores estiman entre 6,21% [VILLAN01] y 8,05% [Murat, 1976]. Ambos semihidratos con la misma estructura romboédrica y con características físicas y micromoleculares diferentes.

El ($SH\beta$) se obtiene por la deshidratación parcial del dihidrato un poco arriba de los 100 °C . El ($SH\alpha$) se fabrica a baja presión en autoclave y se distingue por sus cristales grandes y compactos. El ($SH\beta$) se produce en atmósfera normal y muestra formaciones más fragmentadas.

La densidad real del (SH) de mayor que aquella del doblehidrato ($2,31 \text{ g/cm}^3$) con $2,757 \text{ g/cm}^3$ para el ($SH\alpha$) y $2,619 \text{ g/cm}^3$ para el ($SH\beta$).

El análisis térmico diferencial muestra las diferentes transformaciones que se dan en la piedra de aljez y los semihidratos alfa y beta.

El ($SH\alpha$) es llamado en la construcción yeso alfa, el cual requiere un factor bajo para su amasado (entre 30 y 40 %); esto permite ofrecer un RH duro y resistente.

El ($SH\beta$) con una pureza muy alta se le conoce como “escayola” el cual muestra un factor de agua elevado de alrededor del 80% y ofrece materiales rehidratados más porosos que aquellos del ($SH\alpha$). El yeso de construcción también parte del ($SH\beta$) que es mezclado con otras fases y se le conoce como “yeso multifases”.

A2.1.3.3 Anhidrita III

La Anhidrita III o Anhidrita soluble se obtiene por la deshidratación total del DH a una temperatura entre 110° y 290 °C, este SH se caracteriza por una gran avidez de agua e inestabilidad por que tiende a convertirse en DH incluso con la simple humedad del ambiente.

De acuerdo al SH del que procedan se dan dos formas de anhidrita $III\alpha$ ($AnIII\alpha$) y anhidrita $III\beta$ ($AnIII\beta$). Esta última se encuentra en la industria del yeso en la formulación de escayolas junto al $SH\beta$ y en los yesos de construcción con los $SH\beta$ y anhidrita II.

A2.1.3.4 Anhidrita II

La anhidrita II o insoluble (AnII) se obtiene por deshidratación total del semihidrato entre los 300° y 1.180 °C. No hay consenso entre los investigadores pero se asume que hay tres tipos de (AnII) [WIRSH96]:

- AnII_s Dificilmente soluble, que se produce entre los 300° y los 500 °C
- AnII_i Insoluble, producida entre los 500° y los 700 °C
- AnII_p De pavimentos, más de 700 °C

En mayor o menor medida la AnII es muy estable y para algunas de sus variedades se requiere de activadores de fraguado y lograr así su rehidratación. Las características de insolubilidad de la AnII se aprovechan para retardar el fraguado con otras fases en el yeso de construcción.

A2.1.3.5 Anhidrita I

Este material se obtiene a más de 1.180 °C y tiene poca importancia industrial. Por encima de los 1.400 °C se rompe en enlace iónico del sulfato cálcico y la anhidrita se descompone en óxido de cal y anhídrido sulfúrico. Su uso se limita como yeso de pavimentos cuando el mineral tiene impurezas que permiten disminuir la temperatura de disociación hasta 700 °C donde es una mezcla sólida de óxido de cal y AnII.

A2.2 PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DEL YESO

A.2.2.1 Descripción

La materia prima usualmente procede de canteras a cielo abierto de donde se obtiene la piedra de yeso cruda, la cual es trasladada a plantas trituradoras cuyas características cambian según el grado de trituración que requiere el sistema de deshidratación del que se disponga. Una vez reducida de tamaño, la piedra es calentada en hornos de diversos diseños. Cuando la cocción ha terminado se procede a la molienda fina y al cernido. Finalmente, el polvo es ensacado o depositado en silos.

El sistema tradicional de fabricación de yeso en hornos rudimentarios es ahora poco común en España pero no así en otros países de menor desarrollo, donde sigue siendo una opción viable para producir materiales constructivos accesibles [COBURN89]. En España la operación de la tecnología de fabricación en hornos rudimentarios se limita ya a mercados locales donde se comercializan yesos tradicionales o artesanos, que muestran un nivel de calidad heterogénea y muchas veces inferior a los yesos industriales además de un bajo rendimiento considerando la cantidad de energía empleada para producir yesos rústicos o artesanos o de “primera generación” [ARRED91] [NOVO70].

Al principio de los años sesentas comenzó en España la fabricación generalizada de yesos y escayolas a través de procesos industriales controlados y sistematizados en hornos continuos o intermitentes y que permitieron ofrecer al mercado productos de características mucho más uniformes a los cuales se les denomina “yesos industriales” o de “segunda generación”. También de esta época proviene la fabricación de yeso alfa en autoclave para aplicaciones especiales no de edificación.

En el norte de España al inicio de los setentas se comenzó a usar la perlita como material de aligerado para yesos y escayolas. De forma simultánea se inicio la aplicación generalizada de

aditivos. Estas nuevas formulaciones mejoradas de yesos y escayolas de “tercera generación” fomentaron su uso en la construcción, además de promover aplicaciones entonces novedosas como adhesivos, yesos para prefabricados y para proyección mecánica. También se ofrecieron al mercado materiales que permitieron la sustitución mejorada de yesos anteriores como fue el caso de revestimientos.

A2.2.2 Yeso de construcción

EL yeso de construcción yeso bifase demanda para su fabricación una piedra de aljez con una pureza del 75% o más. Este yeso por lo general es producido en un sistema de fabricación conjunto. En un sólo horno rotatorio con fuego directo se producen SH β , AnIII, y AnII.

Las anhidritas se extraen del horno en diferentes puntos de acuerdo a su temperatura de calcinación y posteriormente se mezclan, usualmente un 75% de AnIII con 25% de AnII. En el silo de reposo la AnIII se transforma en SH al descender la temperatura del material.

Al salir del silo, el yeso bifase es sometido a un proceso de molturación para lograr la granulometría deseada, después es ensacado o nuevamente ensilado. Si el material se destina a ser comercializado como yeso grueso es probable que esta etapa de molturación sea innecesaria. Previo a su envasado en sacos el yeso es formulado con aditivos y otros modificadores.

A2.2.3 Escayolas

Estos materiales requieren de piedra de yeso de muy alta pureza por encima de los 90%. Es un yeso muy apreciado y al que se le considera de alta calidad.

Para la fabricación de escayolas es común el uso de dos sistemas:

1. Con fuego indirecto y carga intermitente (marmita) que permiten conseguir una temperatura fija de deshidratación.
2. En horno rotatorio con fuego directo y carga continua.

Después de su cocción la escayola es conducida a un silo de enfriado donde la AnIII se transforma en SH β .

Previo a su ensacado el material puede pasar por un molido fino si así lo demanda el mercado. En este momento la escayola permite su formulación para cumplir características específicas.

A2.2.4 Yesos de prefabricados

Estos yesos se usan en la producción de paneles o bloques de tabiques. Están hechos a base de piedra de alta pureza la cual es triturada e introducida en un horno rotatorio. Después de la cocción del yeso se obtiene la AnIII, la cual ya fría en el silo de reposo se transforma en SH β que se combina con DH para promover el fraguado.

A2.2.5 Yeso para la fabricación de placas de yeso laminado

El yeso usado aquí es un compuesto basado en SH β el cual se puede producir en un molino calentador, que al tiempo que produce la transformación del yeso crudo también disminuye su granulometría.

Es común que una vez frío se le adicione yeso crudo para favorecer su fraguado, además de otros aditivos que mejoran la adherencia del yeso al cartón o bien aligeran el peso de las placas.

A2.2.6 Yeso alfa

Se obtiene de piedras de muy alta pureza y con una cuidadosa molienda. Este tipo de yeso es muy popular en la industria cerámica para la producción de moldes. Se fabrica en autoclaves de carga discontinua y fuego indirecto a presión superior a la atmosférica.

A2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS YESOS COMERCIALES

Las propiedades particulares de cada yeso comercial dependen de muchas variables, Novo de Miguel [1970] señala las más importantes:

- 1^a. Calidad y composición de la cantera
- 2^a. Proceso de selección de la piedra
- 3^a. Método de cocción
- 4^a. Temperatura y tiempo empleados en la cocción
- 5^a. Sistemas de molido y acabados que se empleen

Combinadas estas causas pueden ofrecer una innumerable cantidad de tipos de yesos.

En España el “Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción” [RY-85] define los tipos de yesos y escayolas así como también sus aplicaciones frecuentes. El pliego es de obligatoria observancia en todas las obras de construcción españolas.

A2.3.1 Tipos de yeso y escayolas normalizados en España

A2.3.1.1 Yeso grueso de construcción YG

Se designa YG al yeso grueso de construcción. Constituido fundamentalmente por sulfato cálcico semihidratado (SH) y anhidrita II artificial, con la posible incorporación de reguladores de fraguado.

A este yeso se le llamaba antiguamente yeso negro, moreno o tosco. Los usos comunes para este material son las de pasta de agarre para tabiques, revestimientos interiores y conglomerante auxiliar en obra.

A2.3.1.2 Yeso fino de construcción YF

El yeso fino de construcción YF lo constituyen principalmente el SH y AnII artificial de granulometría fina. Permite incorporar reguladores de fraguado. Mejor conocido como yeso blanco, el YF se emplea comúnmente en enlucidos y revestimientos interiores.

A2.3.1.3 Yeso prefabricado YP

El yeso de prefabricado YP esta constituido en lo principal con SH y AnII artificial, con una mayor pureza que aquellos materiales usados en los yesos gruesos y en los yesos finos. Su aplicación usual se da en la producción de elementos de construcción prefabricados para tabiques.

A2.3.1.4 Escayola E-30 ó E-35

La escayola o la E-30 o la E-35 se usan principalmente para la producción de tabiques y techos. La escayola es un yeso que procede de una piedra mucho más pura y que es molturada muy finamente para después ser adicionada con reguladores de fraguado. Su resistencia a la flexotracción es mayor que la de los yesos gruesos, yesos finos (20–25 kp/cm²) e igual o mayor que los yesos para prefabricados (30–35 kp/cm²).

El pliego [RY –85] señala además de las abreviaturas YG, YF, YP, E-30 y E-35 a las letras L y R en función de los períodos de trabajabilidad de los materiales como lento (L) y rápido (R). La tabla A2.1 muestra las principales características de los yesos comerciales según el RY-8.

Tabla A2.1 Características límites de yesos y escayolas en España

Características	Tipos y clases									
	YG	YG/L	YF	YF/L	YP	E-30	E30/L	E-35	E35/L	
Químicas:										
Agua combinada en % máximo	6		6		6	7		7		
Índice de pureza (total en sulfato de calcio y agua) en % mínimo	75		80		85	90		92		
Sulfato de calcio semihidratado (SO ₄ Ca 1/2H ₂ O) en % mínimo	-		-		-	85		87		
pH mínimo	6		6		6	6		6		
Finura del molido:										
Retención en tamiz 0,8 UNE 7.050 en % máximo	-		-		-	0*		0		
Retención en tamiz 0,2 UNE 7.050 en % máximo	50		15		30	5*		1		
Resistencia mecánica a flexotracción, mín. en kp/cm ² (M Pa)**	20 (2,0)		25 (2,5)		30(3,0)	30 (3,0)		35 (3,5)		
Trabajabilidad:										
Tiempo en pasar del estado líquido al plástico máx. en min.	8	20	8	20	8	8	20	8	20	
Duración del estado plástico, mínima en minutos	10	30	10	30	10	10	30	10	30	

* Cuando la E-30 se emplea para ejecutar elementos prefabricados para tabiques (UNE 10020) puede admitirse hasta un 30 100 en el tamiz 0,2 sin limitar la retención en el 0,8.

**Los valores en (M Pa) son aproximados y tienen un carácter indicativo.

Fuente: Arredondo, F. (1991) *Yesos y cales*. Madrid: ETS Ingenieros de caminos. p: 21.

A2.4 PROPIEDADES DE LOS YESOS EN POLVO

Se caracterizan por su composición química, el contenido en diferentes fases del sistema SH-agua y su finura de molido, también por los aditivos y agregados que presenta o puede recibir el yeso.

A2.4.1 Finura del molido

El molido es uno de los últimos pasos en la fabricación del yeso deshidratado y reposado. Esta parte del proceso es de gran importancia y puede hacerse notar en las propiedades finales del yeso. Al unir el yeso con agua y amasar se forma una pasta que endurece en un solo cuerpo, esto es que el yeso reacciona con el agua y cuanto mayor sea la finura del yeso en polvo más completa será la reacción y mejor el yeso que resulta.

Una forma común para determinar la finura de un yeso en polvo se señala en el pliego RY-85. Se usan dos tipos de tamices con 0,2 y 0,8 mm de luz de malla, ambos relativos a la UNE 7050 [AENOR85]. Las limitaciones para aprobar la finura de los polvos de yeso usando ambos tamices y según el tipo de yeso, se señalan en la tabla A2.1. Resalta la exigencia para los sedimentos máximos aceptados para la escayola (E-30) y la escayola especial (E-35) con 5 y 1% respectivamente. Por otro lado el yeso grueso (YG) acepta sedimentaciones que pueden ir hasta el 50% de retención sobre el total de la muestra.

A2.4.2 Composición química

El yeso es químicamente sulfato cálcico hidratado con media molécula de agua (SH) y que procede del sulfato cálcico doblemente hidratado (DH):



En ese proceso cualquier sustancia distinta presente en el yeso se asume que es una impureza del material [GOMÁ79].

A2.4.3 Índice de pureza de los yesos en polvo

El "índice de pureza" de los yesos y escayolas en polvo se definen como el contenido teórico total del sulfato cálcico-agua del producto expresado en tanto por ciento en masa de la muestra que se trate. Para la obtención del índice de pureza se atiende a la relación teórica entre los pesos moleculares del anhídrido sulfúrico (SO₃) y del sulfato cálcico (SO₄ Ca) que es igual a 1,70 se supone que todo el sulfato presente en la muestra es sulfatos cálcico. Al sulfato se le añade el contenido de agua combinada (H₂O) para obtener una aproximación práctica del contenido teórico total en las dos fases.

Los ensayos para determinar los contenidos de agua libre y de agua combinada se describen en la norma UNE 102 032 [AENOR01].

El índice ofrece una idea acerca de la materia prima de partida y del yeso o escayola en polvo que resulta. El estudio de las impurezas presentes coopera también para el conocimiento de las propiedades del producto final, no obstante su importancia es un tema poco estudiado. Villanueva y otros [2001] señalan que dentro de ciertos límites las impurezas arcillosas facilitan la manipulación de los yesos durante la aplicación; las impurezas de sílice aumentan la dureza superficial y las impurezas de caliza son fluidificantes de las pastas.

Para determinar con precisión la composición de un producto se requiere de un análisis de fases que se puede practicar con un análisis térmico diferencial. La norma UNE 102 037 [AENOR] describe el análisis mencionado, que además de los contenidos de agua combinada y de anhídrido sulfúrico (SO_3) informa de la presencia de; anhídrido carbónico, sílice y residuo insoluble, óxidos de aluminio, óxidos de hierro, óxido cálcico, óxido magnésico y cloruro sódico.

Estos datos después se transforman en cantidades y porcentajes de:

Sulfato cálcico dihidratado
Sulfato cálcico hemihidratado
Sulfato cálcico anhídrido
Exceso de óxido de calcio (CaO) o de anhídrido sulfúrico (SO_3)
Cloruro sódico
Carbonato cálcico
Otros productos de menor presencia
TOTAL 100%

A2.4.4 Aditivos para yesos y escayolas

Los aditivos son productos que modifican o añaden alguna propiedad a los yesos y escayolas cuando se añaden inclusive en pocas cantidades.

A2.4.4.1 Aditivos retardadores de fraguado

En muchas situaciones en la industria de la construcción o en la de los prefabricados se requiere de retardar el proceso de fraguado. Los procedimientos comunes para controlar el tiempo de fraguado y endurecimiento de yesos y las escayolas son:

- a. Amasando con un exceso de agua en la mezcla

Aunque es una práctica común, esta implica la pérdida de propiedades mecánicas de los productos así fabricados.

- b. Añadiendo aditivos retardantes

Dependiendo de su presentación se mezclan íntimamente con el yeso en polvo o se disuelven en el agua de amasado. Hay tres grupos principales de aditivos retardantes del fraguado:

- De alto peso molecular. Retrasan al fraguado actuando como coloides al tiempo que también retrasan la cristalización. Provocan en espesamiento de la mezcla. Aquí se encuentran: colas animales, caseína, pepsina, albúmina, gelatina y proteínas hidrolizadas.
- Aditivos que disminuyen la solubilidad del SH en agua. Son los más comunes y funcionan igualando las solubilidades lo que disminuye la velocidad de reacción. Aquí los ácidos cítricos, bórico, acético, láctico, alcohol etílico, acetona y carbonato sódico.

- Aditivos que modifican la estructura cristalina del DH. Acetato de calcio, carbonato de calcio y magnesio.

A2.4.4.2 Aceleradores del fraguado

Son dos grupos de aceleradores:

1. Los que actúan como gérmenes en la cristalización. Suprimen la primera fase del fraguado que consiste en la formación de hidratos primeros. El más usado como acelerador es el propio yeso crudo dihidratado.
2. Los que disminuyen la solubilidad del DH o aumentan la del SH. Aumentan la diferencia de solubilidad y con ello la velocidad de fraguado, aquí se incluyen los ácidos sulfúrico, clorhídrico, nítrico, cloruros, bromuros y yoduros alcalinos, bicromato de potasio.

A2.4.4.3 Espesantes y retenedores de agua

Estos aditivos aumentan la consistencia de la mezcla, también retardan el fraguado del yeso. Los espesantes han sido una aportación para otras aplicaciones del material como lo son los yesos proyectados. Algunos espesantes también cooperan a retener el agua en la mezcla evitando su evaporación o migración cuando se aplican sobre un material absorbente. Un espesante muy conocido es el almidón.

A2.4.4.4. Fluidificantes

El proceso de rehidratación del yeso demanda mucho menos agua que para el fraguado, COSTES [1970] y ARREDONDO [1991] señalan que teóricamente 18,6% de agua permiten que se realice la reacción del hemihidrato. En la práctica esto no es viable debido a la dificultad de su amasado y a la rapidez del fraguado que se producirían. El uso de los yesos y escayolas fuera de los laboratorios de ensayo requiere de agregarse al hemihidrato altos porcentajes de agua; de ésta una parte participa de la reacción y el resto se evapora dejando una estructura porosa que si bien coopera a disminuir la densidad, la dureza del cuerpo endurecido también disminuye su resistencia. Se demanda entonces un producto que disminuya la proporción de agua de amasado pero que permita obtener un aceptable manejo de la masa plástica, y eventualmente productos fraguados con mejores propiedades.

Los fluidificantes para el hormigón de cemento pueden utilizarse con éxito en yesos y escayolas aunque tienen la como desventaja que producen cambios en el color y apariencia de estos.

A2.4.4.5 Impermeabilizantes

El agua y aún sólo la humedad reblandecen y degradan al yeso. Los impermeabilizantes mejoran las características de productos de yeso que deben cumplir con cierto grado de impermeabilidad al paso de agua líquida. La presencia de agua dentro de la estructura porosa del yeso tiene en mayor o menor medida una acción destructora, no sólo por la lenta disolución que produce, sino por la rápida pérdida de resistencia que experimenta el cuerpo al ingresar el líquido por su red capilar. Diversos investigadores señalan que un 1% de agua produce un

descenso de hasta el 52% en la resistencia de yeso compuesto de hemihidrato puro. [NOVO70].

Parece que no hay un producto o proceso de impermeabilización de yesos o escayolas plenamente satisfactorio para todos los participantes de la industria del yeso y la construcción con yeso. A continuación se mencionan los más empleados:

- Disoluciones impregnadas en productos endurecidos. Silicatos o fluorosilicatos, jabones solubles, alumbre, bórax, resinas naturales y resinas sintéticas.
- Impermeabilizantes de aplicación superficial sobre productos acabados. Aceites naturales, oleato de aluminio, cera de abeja, parafina, asfaltos o betunes, cola de caseína.
- Adición de sustancias previamente o durante el amasado. Talco, caolín, cal, cemento Pórtland, jabón insoluble, sulfato potásico, estearato de aluminio, cola bicromatada, escoria de altos hornos.
- Empleo de agentes aireantes. Los efectos de los agentes aireantes comprobados en cementos y hormigones se aprovechan también para disminuir la cantidad de agua necesaria para el amasado de yesos y escayolas, en consecuencia se permite obtener productos con una considerable disminución de agua en su red capilar y una mejor resistencia.

Otros efectos del uso de agentes retardantes es el de retrasar de forma controlada el tiempo de fraguado, al yeso grueso le da una mejor plasticidad y permite obtener productos aligerados de yeso.

A2.4.5 Agregados

Para modificar las características originales es práctica común formular yesos y escayolas con agregados en proporciones mucho mayores que las usadas para los aditivos. Los agregados más frecuentes son los áridos inertes y los áridos ligeros que incluyen en la mezcla un volumen controlado de aire ocluido lo que permite mejorar el aislamiento térmico del cuerpo fraguado.

A2.4.5.1 Perlita expandida

Se trata de un mineral volcánico con una estructura de pequeñas esferas blancas que contienen escamas de agua y aire atrapados. Expandida en autoclave a alta temperatura pierde el agua combinada y deja un árido ligero formado por microceldillas que contienen aire atrapado con un volumen de hasta veinte veces superior al original. La perlita expandida ha ganado notoriedad como un agregado de alta compatibilidad con yesos y escayolas.

A2.4.5.2 Vermiculita exfoliada

La vermiculita es un mineral de tipo arcilloso con una microestructura laminar que es capaz de romperse en planos paralelos o exfoliarse cuando es sometido a un aumento de temperatura elevado. Esto produce cuerpos alargados que contienen aire atrapado en su interior. La vermiculita agregada aporta a los cuerpos de yeso mejoras de aislamiento térmico y un efecto retardador de absorción de agua.

A2.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS PASTAS DE YESO O ESCAYOLA Y AGUA

A2.5.1 Agua de amasado

Para el amasado se requiere más agua que para la pura rehidratación del material, debido a que el fraguado comienza por una disolución en agua de las fases anhidras y semihidratadas presentes en el yeso en polvo del que se trate.

El fraguado es un fenómeno que se debe a la sobresaturación del SH. Su rapidez de cristalización y desarrollo dependen de la cantidad de agua que se use para el amasado; mientras menos es la cantidad de agua menor el tiempo de fraguado. La cantidad de agua para el amasado la determinan el tipo de producto y su granulometría.

Por otro lado, un yeso puro necesitará de más agua que uno impuro, debido a que este último contiene menos cantidad de productos activos por lo que se saturará más rápidamente.

En la norma UNE 102 031 [18] se encuentran dos sistemas para determinar las cantidades de agua de amasado, el primero de “amasado a saturación” y el segundo como agua correspondiente a una “consistencia normal”.

El amasado a saturación consiste en depositar yeso dentro de un recipiente con agua espolvoreándolo cuidadosamente hasta que el yeso sacia el volumen de agua y se enrasa con la superficie del líquido. Costes y Villanueva [2001] señalan algunos valores aproximados de cantidades de agua para amasado de yesos de segunda y tercera generación. Tabla A2.2.

Tabla A2.2 Agua de amasado para diferentes productos

Productos tradicionales	Agua/yeso de amasado a saturación
Yeso de construcción grueso	0,6
Yeso de construcción fino	0,7
Escayola	0,8
Yeso α	0,4
Productos no tradicionales	Agua/yeso recomendada para consistencia normalizada
Yeso manual aligerado	0,50 - 0,70
Yeso retardado manual	< 1,0
Yeso de proyectar	0,6 - 0,7
Yeso aligerado de proyección mecánica	0,6
Yeso de alta dureza, normal y de proyección mecánica	0,55 - 0,60

Fuente: Villanueva, L. (2001). Manual del yeso. Madrid: ATEDY. p: 53.

El agua correspondiente a consistencias normalizadas es la necesaria para que la pasta adquiera la consistencia marcada en la norma que suelen ser fijas y determinadas para cada producto.

A2.5.2 Fraguado de yesos y escayolas

Cuando se mezcla agua y partículas de yeso SH se da una reacción rápida que va acompañada de una fuerte elevación en la temperatura y un ligero aumento de volumen. Este fenómeno se le conoce como “fraguado” y termina con el endurecimiento de la mezcla formando así un nuevo cuerpo.

No obstante el paso del tiempo el proceso del fraguado aún se debate alrededor de dos explicaciones [BURG77], en la primera Le Chatelier [1979] señala que al amasar yeso cocido se forma una solución saturada respecto al HM ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), pero fuertemente sobresaturada respecto al DH ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), formado por hidratación de aquel, estable y de menor solubilidad. Esto es resultado de que el HM tiene una solubilidad cercana a los 10 g/l a temperatura ambiente, pero este SH es cinco veces más soluble que el DH. La discusión pasa ahora a como se da la cristalización más o menos rápida del yeso. Se explica a partir de núcleos de DH que han permanecido sin modificar en la cocción. Se disuelven entonces nuevas cantidades del HM hasta lograr la hidratación total. No obstante también se acepta que la cristalización puede ser espontánea. Estos fenómenos tienden a presentarse simultáneamente; la disolución continua de nuevas cantidades de yeso cocido compensa la disolución continua de cristales del DH.

Por otro lado investigadores como Cavazzi [1979] han sostenido que el fraguado de yeso es un proceso coloidal o de geles. Cuando se mezcla el yeso cocido con el agua se forma un gel intermedio y a partir de su coagulación se produce la cristalización del yeso. Otras investigaciones como las de Becherer y Fiedler [1979] dedujeron a partir de estudios propios que no existe la formación de geles durante el fraguado y el endurecimiento. Sin embargo, aunque el fenómeno de la "cristalización" en ausencia de fases coloidales da señas de ser mejor aceptada en la comunidad científica no parece haber pleno consenso al respecto del tema.

Para los efectos de este trabajo podemos decir que el fraguado es un conjunto de fenómenos físicos y químicos ambos estrechamente relacionados:

- a. El fenómeno químico es una reacción de hidratación en la que las fases anhidras y semihidratadas del sulfato cálcico que al contacto con el agua se disuelven y se transforman en sulfato cálcico dihidratado. La reacción produce calor.
- b. El fenómeno físico íntimamente relacionado con el fenómeno químico consiste en una disolución inicial de las fases anhidras o semihidratadas en agua y una solidificación del DH a partir de una disolución sobresaturada de éste que precipita cristalizado. El proceso de cristalización también se acompaña de una expansión de volumen que en general es mayor cuanto más lenta es la velocidad de hidratación.

Villanueva y García [2001] señalan que el proceso de fraguado pasa por cuatro etapas:

1. Disolución de fases

Las fases anhidras y semihidratadas forman un sistema de iones saturado con relación a las fases y sobresaturado con relación al DH. Aquí se da la formación de hidratos primarios.

2. Período de inducción

Los hidratos primarios se estabilizan y actúan como núcleos de cristalización. La mayor o menor presencia inicial coopera a la velocidad del fraguado al actuar directamente como núcleos.

3. Crecimiento de los núcleos

4. Disminución de las fases anhidras y semihidratadas aprovechables para crecimiento de los cristales. Disminuye también la velocidad de hidratación.

El cambio físico del fraguado parte de la pasta en estado líquido incapaz de resistir esfuerzos cortantes. La pasta va aumentando su dureza superficial hasta que el producto es capaz de resistir una presión estimada en 5 kg/cm^2 momento en el cual se considera que pasa al estado sólido.

Se denomina “principio de fraguado” al momento en que la pasta pasa del estado líquido al estado plástico y el “final de fraguado” al momento que pasa del estado plástico al estado sólido.

Villanueva y García [2001] proponen varias maneras para medir el fraguado de acuerdo a las características del mismo:

- Por el aumento de temperatura de la pasta a lo largo del proceso
- Por la resistencia a la penetración de la aguja Vicat
- Por su aumento a la resistencia eléctrica
- Por su expansión de volumen

Los comportamientos de la pasta durante su paso del estado líquido al sólido depende de varios factores entre ellos los principales son:

- Granulometría del polvo de yeso. Mientras más fino sea el tamaño del grano de yeso más agua precisa para su amasado
- La tensión superficial. Participa de los procesos de adhesión sobre diferentes superficies
- La cantidad de agua de amasado y el sistema de evaporación del agua sobrante también intervienen en la fluidez de la pasta y la estructura porosa del sólido fraguado.

También participa el intercambio de agua libre por absorción y adsorción.

A2.5.2.1 Expansión de las pastas de yeso y escayola

El yeso y la escayola se diferencian de otros conglomerantes como la cal y el cemento, en el que su fraguado va acompañado de una expansión y no una retracción de volumen. La expansión incide en las propiedades de dureza superficial y de reproducibilidad de un producto del yeso del que se trate.

Cuando el producto de yeso se ha secado se produce una retracción que no llega a anular la expansión previamente producida. Arredondo [1991] estima que el hinchamiento final se encuentra entre el 0,3 y 1,5 % del total de la masa que se trate. Por su parte Villanueva y García Santos [2001] señalan que el aumento de volumen varía en cada fase del sistema. Es relativamente importante y prolongado. Tabla A2.3.

Tabla A2.3 Valores de expansión de hidratación

Fase Aislada	Tiempo de hidratación	Expansión de fraguado
Semihidrato	1 hora	0,3 mm/m
Anhidrita II s	15 días	0,55 mm/m
Anhidrita II i	1 año	1,46 - 1,63 mm/m

A2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS ENDURECIDOS DE YESO Y ESCAYOLA

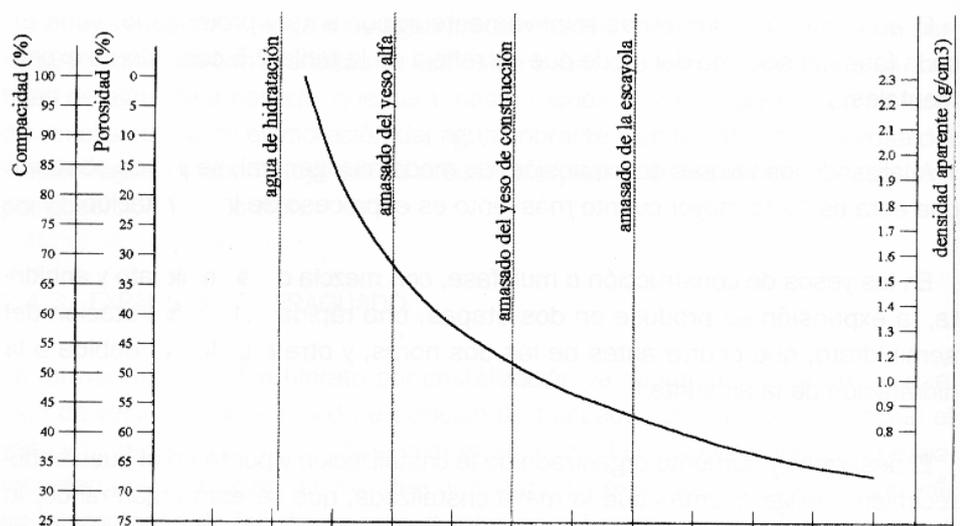
Los productos de yeso y escayola una vez fraguados y endurecidos muestran características que se pueden agrupar en porosidad, resistencia y dureza superficial.

A2.6.1 Porosidad y densidad

Teóricamente se requiere de 18,6 % de agua para el fraguado de un yeso en polvo. En la práctica no es posible. Así se emplean cantidades de agua muy superiores a la necesaria químicamente para la hidratación. Comúnmente se aplican 4 o 5 veces más ese porcentaje cercano al 20% (80-100%), son mucho menos usadas las proporciones menores de 2 o 3 veces (40-60%).

EL agua en exceso permanece en el yeso hasta que encuentra las condiciones propicias para su migración al exterior en forma de vapor; esto deja un cuerpo con espacios vacíos o poros en cantidades en proporción al exceso de agua procedente del amasado.

La porosidad de un producto de yeso es de gran importancia, una masa porosa presenta menores resistencias mecánicas que otra compacta además de tener relación directa con otras características del cuerpo fraguado. Así a más cantidad de agua de amasado, mayor porosidad y menor compactidad, densidad y resistencia. Duriev [2001] relaciona de forma gráfica la cantidad de agua de amasado con algunas propiedades del agua de amasado empleada. Gráfica A2.1:



Gráfica A2.1 Relación entre la densidad, el agua amasado y la porosidad

Villanueva [2001] calcula el volumen de los poros para diversas masas teóricas, señalando que el volumen de un sólido fraguado es superior al volumen del sólido de partida, pero inferior a la suma de sus componentes iniciales o sea SH y agua. Esto explica que la masa obtenida por rehidratación es necesariamente porosa aunque se utilice la cantidad estrictamente necesaria (18,62%) para lograr la reacción. El DH que resulta de la hidratación ocupa en su totalidad el

espacio que inicialmente ocupaba la mezcla de SH y agua. El volumen aparente que resulta no es real, la diferencia aritmética representa el volumen de poros. Los mismos autores señalan que los resultados que se obtienen son aproximados y la porosidad real es inferior Tabla A2.4. No se consideran otros aspectos como la cantidad de agua que absorbe el soporte que recibe a la pasta para el caso que ese sea su uso final.

Tabla A2.4 Porosidad teórica de la hidratación

Productos	Agua de amasado	Volumen de poros	Porosidad total
Escayola	0,8 = 80%	66,9	56,6
	0,9 = 90%	74,4	59,4
Yeso α	0,4 = 40%	24,93	32,7
	0,5 = 50%	34,9	40,5
Yeso de construcción 2/3 SH β + 1/3 AnII	0,8 = 80%	64,4	52,1
	0,9 = 90%	73,1	58,2
	1,00 = 100%	83,1	61,3

Fuente: Villanueva, F(2001). Manual del yeso. Madrid: ATEDY. p: 64.

La cantidad de agua empleada para el amasado se traduce en la densidad y el porcentaje de porosidad del cuerpo fraguado (tabla A2.5). Si bien es cierto que a mayor porcentaje de porosidad disminuye la resistencia del material por otro lado aumentan sus propiedades como material aislante térmico para la construcción y se mejoran sus comportamientos al fuego.

Tabla A2.5 Influencia del agua de amasado en la densidad del rehidrato, para un yeso de construcción

Agua/yeso de amasado	Agua de amasado	Densidad aparente (g/cm ³)
0,60	60%	1,1
0,70	70%	1,8
0,80	80%	1,0
0,90	90%	0,95
1,00	100%	0,88
1,20	120%	0,75

A2.6.2 Contenido en humedad en los productos de yeso y escayola

El resultado del exceso de agua en la reacción de fraguado y su evaporación resultan en una compleja red capilar ramificada, con poros de diversos tamaños y comunicados entre sí. Esta red permite la introducción de moléculas de vapor de agua del exterior, las moléculas permanecen dentro hasta que las condiciones del exterior del cuerpo fraguado promueven que sean cedidas nuevamente al medio. Los cuerpos de yeso de esta manera capturan, acumulan y ceden agua al ambiente, se les puede considerar reguladores de humedad.

El “contenido de humedad” es la cantidad de vapor de agua almacenada en la red capilar expresada en por ciento sobre el peso seco del material que se trate. También se le conoce como “contenido de agua libre” y que corresponde al vapor de agua que no se ha combinado con el DH.

El secado del yeso o escayola amasados se efectúa con mayor o menor duración bajo la humedad relativa del medioambiente que sea, aunque ésta sea muy elevada, y se estabiliza en la denominada “humedad de equilibrio” que oscila entre 0,1 y 1,0 % para los diversos productos de yeso bajo condiciones usuales (20 °C y 45-95%).

A2.6.3 Resistencia mecánica de productos fraguados de yeso y escayola

La resistencias mecánicas de tracción y compresión de los yesos dependen de varios factores; de su naturaleza, de su granulometría, de su composición, de la cantidad de agua de amasado y del contenido de humedad al momento de su ensayo.

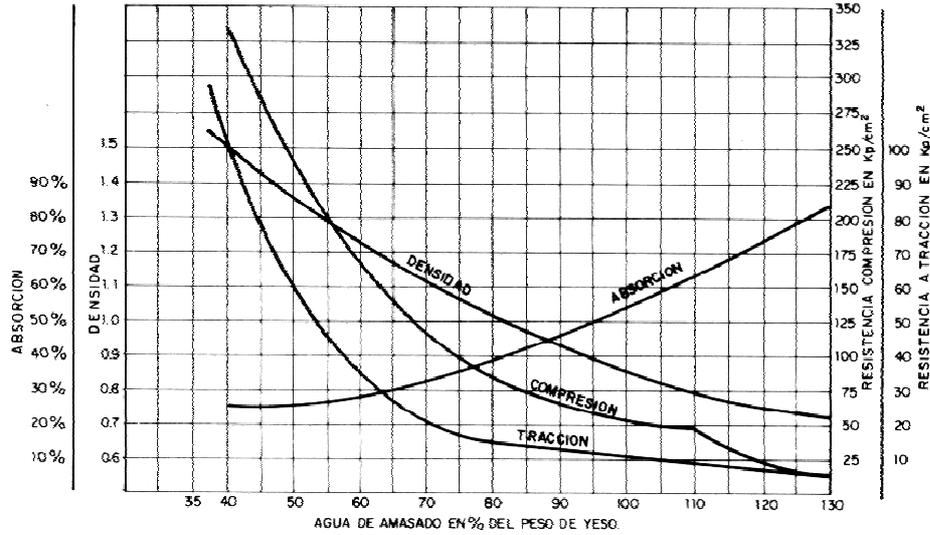
Es del conocimiento común que el yeso y la escayola son materiales poco recomendables para usarse en zonas expuestas a la acción del agua. Esto es fácilmente atribuible a la solubilidad en agua del yeso. Como señalan Arredondo [1991] para lograr la disolución de un cuerpo de yeso de 1 m² y 1 cm de espesor, sería necesaria la presencia de 1m³ del líquido el cual quedaría saturado. Esta situación es sumamente extraña en una edificación.

La principal razón de los efectos negativos del agua sobre el yeso y su resistencia mecánica se encuentran en su tendencia a absorber agua a través de su red capilar. Los investigadores coinciden en explicar la pérdida de resistencia mecánica de los cuerpos fraguados de yeso debido a la presencia de vapor de agua libre en los poros y que actúa a similitud de un lubricante, haciendo posible el movimiento de los cristales bajo un carga determinada; en otras palabras disminuyendo su resistencia [VILLAN01].

Este fenómeno es de gran importancia ya que el efecto de pequeñas cantidades de agua pueden reflejarse en altas pérdidas de resistencia, como lo demuestran experimentos partiendo de probetas secas que al añadirles 1% de agua reportan una pérdida de más del 50% en su resistencia original, inclusive cantidades tan pequeñas como 0,04% provocan una pérdida medida del 33%. De aquí la necesidad de experimentar a los yesos a través de probetas completamente secas.

La importancia del contenido de humedad para la resistencia mecánica de los yesos indica la necesidad de solucionar el problema a través de su impermeabilización total. Muchas técnicas se han aplicado sin embargo para la industria de la construcción el problema dista mucho de estar solucionado.

Si bien el contenido de humedad es uno de los factores clave para la resistencia de cuerpos de yeso, otros factores importantes son la porosidad del producto y por lo tanto su densidad, que es función de la cantidad de agua empleada para su amasado, como se muestra gráficamente en la gráfica A2.2 donde en base al agua de amasado (porcentaje en peso) empleada permite observar el comportamiento de la misma sujeta a esfuerzos de compresión y tracción, además de las densidades que se obtienen y el comportamiento de absorción de agua. [ARRED80]:



Gráfica A2.2 Relación entre el agua de amasado y la densidad, la absorción y las resistencias a tracción y compresión del yeso. Tomado de Arredondo

La tabla A2.6 ofrece algunas resistencias indicadas como mínimos según la norma UNE 102 031 en flexotracción y compresión para varios tipos de yesos y escayolas, considerando formulaciones típicas en la construcción:

Tabla A2.6 Valores mecánicos mínimos para diversos productos de yeso. Según UNE 102 031

TIPOS DE PRODUCTOS	A/Y de amasado	RESISTENCIA		
		Flexotracción N/mm^2	Compresión N/mm^2	Dureza N/mm^2
Yeso Grueso	0,8	2*		
Yeso Fino	0,8	2,5*		
Yeso prefabricado	0,8	3*		
Escayola E-30	0,8	3*		
Escayola E-35	0,8	3,5*		
Escayola E-35	0,73	4,8	11,2	19,1
Yeso de Construcción	0,6	5,1	15,5	25,9
Yeso α	0,38 (1)	12,3	40,4	92,0

(*) Valores mínimos , según norma UNE.
 (1) Valores tomados de Wirching. [1996]

A2.7 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE YESOS Y ESCAYOLAS

A2.7.1 El aislamiento térmico

El aislamiento térmico esta relacionado con el “confort ambiental”, la economía de energía y la reducción del consumo de combustible; en suma, con la idoneidad energética del edificio.

La idoneidad energética debe establecerse en base al uso de la edificación que se trate y a la “habitabilidad térmica del mismo”; esta última se desprende de la idoneidad energética, por lo cual establece una relación entre temperatura y humedad analizando los parámetros que influyen en su variación.

Con atención a los aspectos arquitectónicos, los factores que influyen en el estado térmico de una edificación se pueden clasificar en: [VILLAN01].

- Factores formales o de exteriores del edificio, como son su orientación y posición.
- Factores constructivos o del sistema constructivo. El coeficiente de transmisión térmica (λ) y el espesor de los muros del cerramiento.
- Factores exteriores. La climatología y los elementos de intercambio de temperatura y humedad entre el exterior y los elementos constructivos del cerramiento.
- Factores interiores. Son elementos que pueden cambiar los valores higrotérmicos de los edificios incluyendo a cuerpo humano.

La ausencia de aislamiento térmico en la construcción provoca:

- Falta de confort y habitabilidad en su interior
- Tensiones higrotérmicas de dilatación y retracción en los materiales y cerramientos que provocan deformaciones y roturas.
- Condensaciones tanto en las superficies de los cerramientos como en los interiores de la construcción.

La “habitabilidad térmica” busca conseguir una sensación de bienestar a través del aislamiento térmico que se puede lograr con una “zona de bienestar” misma que incluye:

- Aire inmóvil
- Ocupantes en reposo o realizando trabajos con vestimentas normales
- Superficies de los paramentos interiores de los locales con la misma temperatura ambiente interior.

El calor pasa de un cuerpo caliente a otro menos caliente mediante tres posibles maneras: por conducción, por convección y por radiación. En este documento interesa de forma básica la transmisión de calor por radiación y la participación del yeso para impedir esa transmisión en las construcciones donde sea instalado, aunque no se puede pasar por alto la contribución de las otras dos formas básicas de transmisión del calor.

A2.7.1.1 Coeficiente de conductividad térmica

Se define como la cantidad o flujo de calor que pasa en un tiempo determinado por unidad de superficie de una muestra de extensión infinita, caras plano paralelas de espesor la unidad, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de un grado [VILLAN01].

El coeficiente de conductividad térmica es una característica de cada material y depende de:

- La densidad del material. La densidad guarda una relación directa con su porosidad, esto es con la cantidad de poros presentes en el material, su tamaño y el tipo de gas que quedo encerrado al producirse el poro.
- La humedad del material. La cantidad de agua o humedad en el interior del material. La presencia del líquido o vapor de agua atrapados hace que aumente la conductividad ya que el aire es un excelente aislante térmico y por el contrario el agua es un buen conductor de calor.

A2.7.1.2 Normativas

Los aspectos que regulan el aislamiento térmico en edificaciones, sus condiciones exigibles y los datos necesarios para su determinación se encuentran en:

Norma básica NBE – CT – 79 [1979] (B.O.E de octubre de 1979)

A.2.7.1.3 Valores para productos de yeso

Coefficiente de conductividad térmica. Hay una gran cantidad de valores de conductividad térmica para productos fabricados con yeso y escayola.

En productos aligerados de yeso como el yeso celular, se alcanzan valores sumamente ventajosos como aislantes térmicos. Mientras en yesos más densos se obtienen valores aún ventajosos comparados con otros materiales para la construcción de aplicaciones similares.

La Norma NBE-CT-79 [1979] muestra diversos coeficientes de conductividad térmica para diversos materiales:

Tabla A2.7 Valores de conductividad térmica de materiales de construcción según NBE-CT-79

Materiales	Densidad aparente (kg/m ³)	Conductividad Térmica (λ) (kcal/mh °C)
Pastas, Morteros y Hormigones		
<i>Revestimientos continuos</i>		
Morteros de cal y bastardos	1.600	0,75
Morteros de cemento	2.000	1,20
Enlucido de yeso	800	0,26
Enlucido de yeso con perlita	570	0,16
<i>Hormigones normales y ligeros</i>		
Hormigón armado normal	2.400	1,40
Hormigón con áridos ligeros	600	0,15
Hormigón con áridos ligeros	1.000	0,28
Hormigón con áridos ligeros	1.400	0,47
Hormigón celular con áridos silíceos	600	0,29
Hormigón celular con áridos silíceos	1.000	0,58
Hormigón celular con áridos silíceos	1.400	0,94
Hormigón celular sin áridos	305	0,08

A2.7.1.4 Calor específico

Para los tendidos de yeso se les adscribe un calor específico de aproximadamente 900 j/kg, para una humedad de equilibrio de hasta 1% y una densidad de 900 kg/m³.

Tabla A2.8 Coeficiente de conductividad térmica de cálculo según NBE-CT-79

Material	W/mK	Kcal/hm ° C
Enlucido de yeso	0,30	0,26
Enlucido de yeso con perlita	0,18	0,16
Placa de yeso laminado	0,18	0,16
Placa de escayola	0,30	0,26

A2.7.1.5 Influencia del yeso en el aislamiento de las capas límites de contacto sólido-aire

En la transmisión por convección libre de una capa límite no existe influencia de los materiales. No obstante bajo la presión del viento los fenómenos de convección en las capas límites, pasan de ser libres a ser forzados y en este paso el coeficiente transmisión del calor por convección depende directamente del coeficiente de fricción y de la velocidad del viento. Mientras más lisa la superficie será menor el coeficiente de fricción y mejor el aislamiento del material.

El coeficiente de fricción del yeso alisado es muy bajo, sólo superado por el vidrio. Esta característica coopera a calificar al yeso como un material de notables para aplicarse como aislante térmico expuesto al viento.

La relación emisividad-absorción influye en el aislamiento térmico de la capa límite:

El coeficiente de transmisión por radiación depende directamente de la relación “emisión – absorción de energía calorífica” del material. Mientras mayor sea esta relación mayor la transmisión de calor y menor la resistencia térmica. No obstante aunque el yeso tiene alta emisividad, el efecto de aislamiento térmico es poco desfavorable, ya que el yeso tiene una baja absorberencia.

La alta emisividad del yeso lo hace muy apto para ser usado en la calefacción por paneles radiantes ya que emite alrededor del 90% del calor que recibe.

En relación con la recepción del calor por radiación, una parte de la energía que incide sobre la superficie y otra se refleja. Mientras más blanca y brillante sea la superficie del yeso tendrá menor coeficiente de absorción, el cual puede oscilar entre el 10 y 20% de la energía incidente. De esta manera una construcción con aplicaciones interiores de yeso será más fresca en verano y su absorción de calor será menor.

Así el yeso absorbe poca radiación calorífica (10-20%) de la energía que recibe y tiene además una alta emisividad (90%) por lo cual se ve poco afectada por fenómenos de transmisión de calor por radiación.

A2.7.2 Difusión y condensación de vapor de agua

El aire tiene un porcentaje de vapor de agua que ejerce una presión parcial, denominada “presión de vapor de agua”. Para cada temperatura el aire puede almacenar una cantidad máxima de vapor de agua o “vapor de saturación”, rebasada esa presión el vapor de agua se condensa.

El Diagrama psicrométrico muestra la interdependencia de la humedad relativa, la temperatura seca, la masa de vapor de agua por masa de aire seco con su equivalente en presión de vapor (mBar).

Se denomina “humedad relativa” a la relación entre la presión de vapor contenida en el aire y la presión de vapor de saturación para una temperatura determinada. Desde el punto de vista de la regulación higrotérmica interesa evitar condensaciones superficiales y humectaciones en las aplicaciones de construcción, por otro lado se busca obtener las mejores condiciones de humedad relativa dentro de la construcción. Aquí el yeso puede hacer importantes aportaciones como regulador higrotérmico.

A2.7.2.1 Permeabilidad o difusibilidad al vapor de agua (dv)

Es la cantidad de vapor de agua que pasa a través de la unidad de superficie de una material de espesor unidad, cuando la diferencia de presión entre sus caras es la unidad, usualmente expresada en $gr\ cm/mm\ Hg\ m^2\ día$. El inverso de la permeabilidad al vapor de agua es la “resistividad al vapor de agua” (rv).

La difusión relativa del vapor de agua a través del yeso es de unas diez veces más baja que a través del aire, además de ser similar a la de otros materiales porosos cerámicos y algo mayor que la madera de pino.

A2.7.2.2 Condensación

Cuando la humedad relativa de un local se acerca a la presión de vapor de saturación, el vapor de agua se condensa sobre todo en las zonas cercanas a los paramentos más fríos, ahí disminuye la temperatura y la presión de vapor alcanza valores de saturación. El yeso aquí tiene una ventaja sobre otros materiales como el mármol, el vidrio o el metal debido a que estos tres, entre otros más, son más fríos al tacto o tienen mayor coeficiente de penetración térmica.

A2.7.2.3 Transpiración de los yesos y escayolas

Usualmente la presión de saturación es más baja dentro de los edificios que fuera de ellos; entonces una continua difusión de vapor de agua pasa a través de las paredes, de dentro hacia fuera de la edificación, debido a que el vapor de agua va siempre del ambiente de mayor presión al de menor presión de vapor. Esta situación es principalmente notoria durante los fríos meses del otoño y el invierno.

La velocidad de difusión del vapor de agua depende de dos factores; primero de la diferencia de presiones de vapor entre el interior y el exterior de la construcción y segundo de la “difusividad” del paramento.

La difusividad de un elemento de construcción, formado por varias capas de diferentes materiales, se calcula considerando lo siguiente.

- La resistividad al vapor de agua (**rv**), es el inverso de la permeabilidad o difusividad al vapor de agua (**dv**).
- Si el coeficiente de permeabilidad relativa al vapor de agua con relación aire es (μ):

$$\mu = \frac{dv}{dv \text{ aire}}$$

Donde:

dv es la difusividad al vapor de agua del material
dv aire es la difusividad al vapor de agua del aire

El coeficiente de difusión relativa es:

$$\text{Coeficiente de difusión relativa} = \frac{rv \text{ aire}}{rv}$$

Donde:

rv aire es la velocidad de difusión a través del aire
rv es la velocidad de difusión a través del material

A2.7.2.4 Regulación de la humedad

Absorción del agua líquida. Esta propiedad esta directamente relacionada con la conductividad térmica y la densidad del producto de yeso. La define el peso del agua que absorbe una probeta de material sumergido en agua, durante un tiempo determinado y a una temperatura específica.

A2.7.3 Protección contra el fuego

El yeso es un material incombustible y con bajo coeficiente de conductividad térmica, de esta manera resulta un buen material de protección contra el fuego debido a que:

- a. No propaga el calor producido durante en incendio.
- b. Contiene agua libre en equilibrio (± 1) y 20% más incorporada químicamente por lo cual hay que consumir energía calorífica para evaporarla.
- c. El yeso posee dos moléculas de agua por cada molécula de sulfato cálcico ($\text{SO}_4 \text{ Ca } 2\text{H}_2\text{O}$) por lo que absorbe calor para transformarse de dihidrato en anhidrita, ± 300 kcal por kg de yeso, esto es 170 kcal de yeso y la evaporación del agua combinada 130 kcal para los 200 g de agua contenida en el yeso. Mientras el agua no se evapora, la temperatura de la masa de yeso queda por debajo de los 140° C .
- d. El yeso después de deshidratarse si no se ha desprendido, sigue protegiendo el elemento constructivo al que reviste, con un notable aislamiento térmico, debido a su bajo coeficiente de conductividad.
- e. El yeso bajo acción del fuego no produce ningún gas o vapor de carácter tóxico, corrosivo o asfixiante, ni humo ni otro producto susceptible de activarlo.

Si bien es cierto que el fuego en la superficie del yeso deshidrata al material para después calcinarlo y finalmente desintegrarlo, este proceso es gradual tendiendo a lento. La razón como ya se ha mencionado es que el yeso contiene agua que al evaporar en presencia de calor, esto favorece un enfriamiento local y retarda el daño al material.

A2.7.3.1 Normativa de construcción para la prevención de incendios

Los conceptos relativos al establecimiento de las condiciones para la prevención y protección contra incendios que deben cumplir los edificios para suprimir dentro de lo posible las causas que producen la iniciación de los incendios, o evitando su propagación y reduciendo sus efectos, se encuentran en la “Norma Básica Española NBE–CPI–96 sobre condiciones de protección contra incendios en los edificios” además de numerosas ordenanzas municipales. Así los más importante son:

- Reglamento de instalaciones de protección contra incendios
Real Decreto 1942/1993, del 5 de noviembre del Ministerio de Industria y Energía (B.O.E. 14 de diciembre de 1993).
- Norma básica de edificación NBE–CPI–96.
Condiciones de protección contra incendios en los edificios.
- Real Decreto 2177/1996 del 4 de octubre del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (B.O.E. 29 de octubre de 1996).

A2.7.3.2 Comportamiento del yeso ante el fuego

En la norma básica NBE–CPI–96, capítulo 3 artículo 13.2 se establece la clasificación de los materiales a efectos de su “reacción ante el fuego” conforme su grado de combustibilidad, y de acuerdo con las clases establecidas en la norma UNE 23-727 en orden creciente en cuanto a su grado de combustibilidad MO, M1, M2, M3, M4.

En el artículo 17.2 de la norma mencionada se asigna la clasificación de MO para el yeso. Los revestimientos de yeso son adecuados para fabricar elementos constructivos retardadores de fuego (RF 30, RF 60) resistentes al fuego (RF 90, RF 120) y altamente resistentes al fuego (RF 180).

En la NBE–CPI–96 capítulo 3, artículo 13.1 se especifica que la “resistencia al fuego” de un elemento constructivo queda fijada por el tiempo (de acuerdo con los tiempos nominales en minutos 240, 180, 120, 90, 60, 30 y 15) durante el cual dicho elemento es capaz de mantener las condiciones de resistencia mecánica, aislamiento térmico, estanquidad de las llamas y ausencia de emisión de gases inflamables.

En el apéndice 1 de la NBE–CPI–96 se establecen los tiempos de resistencia al fuego, que sin necesidad de ensayo, se podrán otorgar a algunos elementos constructivos. En ellos se puede observar la influencia de los revestimientos de yeso. Abajo se muestra el caso de los muros de hormigón sin revestir y con diferentes espesores, también la resistencia al fuego de muros de tabiques de ladrillo cerámico.

Tabla A2.9 Resistencia al fuego de muros de hormigón sin revestir y ladrillo cerámico

Espesor del muro en cm	10	12	14	16	20	25	>30
Resistencia al fuego (RF)	60	90	120	180	180	240	240

A2.7.4 Producción de yesos aligerados

El yeso es un material con una densidad relativamente baja en condiciones normales (1250 kg/m^3) comparada con otros materiales constructivos comunes como el mortero de cemento (2000 kg/cm^3) o el hormigón ($2100\text{-}2300 \text{ kg/m}^3$). Para promover una reducción en la densidad del yeso se aumenta la participación de agua en su amasado o se le agregan durante su amasado componentes aligerantes durante como la *perlita* o la *vermiculita* que pueden producir notables reducciones en el material al cual se le denomina yeso aligerado (800 kg/m^3).

Otras técnicas también se practican ampliamente para disminuir la densidad del yeso como es la de *Aireación*. Dos métodos se usan comúnmente para la producción de yeso aligerado poroso, el primero se basa en la formación de burbujas de gas en el cuerpo durante el fraguado por medio de aditivos; otro método es la de atrapar aire dentro de la pasta de yeso durante su amasado al mismo tiempo que se le agregan aditivos que disminuyen la tensión superficial de la mezcla, lo que permite obtener yeso aireado cuya densidad desciende de acuerdo a la cantidad de agua de amasado y de los tipos de aditivos empleados [COLAK00]. Las técnicas anteriores pueden ofrecer yesos aligerados con densidades entre 30 - 35% menos (812 kg/m^3).

Sin embargo al aplicar estas disminuciones de densidad hay que considerar que las propiedades de mecánicas del yeso dependen de su estructura porosa. Al disminuir su densidad aumenta su porosidad por lo cual al formular un yeso es imprescindible conocer las aplicaciones que se le darán al material.

A2.8 PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL YESO

La producción mundial de yeso para el año 2000 se estimó en 220 millones de toneladas (MT). De estas 220 MT, 110 MT procedieron de fuentes naturales y otras 110 MT tienen su origen en procesos de desulfuración de los gases de emisión de las plantas térmicas y de otros procesos industriales como la fabricación de algunos fertilizantes o de la fabricación de dióxido de titanio. La mayor parte del yeso se aplica en la construcción, la producción de placas o de cemento, aunque los porcentajes varían entre países.

En los E.U.A el 75% de la producción se utiliza en la producción de prefabricados y sólo alrededor del 15% se emplea en la producción de cemento. En cambio en España el yeso destinado a la fabricación de prefabricados representa el 35%, el yeso de construcción es equivalente al 39% y el yeso para la fabricación de cemento es el 14% del consumo total. Hay un cierto consenso [IGME04] en que el consumo de yeso de desulfuración aumentará su producción a una velocidad mayor que la de los otros tipos de yeso debido a la construcción de plantas de prefabricados diseñadas para ese material. Hoy el yeso de desulfuración se produce fundamentalmente en E.U.A, Europa y Japón pero su producción está creciendo en países en vías de desarrollo donde en un futuro será una materia primordial. En el año 2000 el yeso de desulfuración representó alrededor del 40% de la producción total del yeso natural y se espera que esta relación siga creciendo para el nuevo material.

Por otro lado el consumo de yeso natural a nivel mundial está en estrecha relación con las tendencias de producción del cemento, la cual se prevé aumente a un ritmo que oscilará entre el 1 y el 2% anual entre 2002 y 2007. El principal mercado para el cemento está en Asia, donde a finales del siglo pasado se produjo más del 60% del cemento del mundo. Debido a la presencia del yeso de desulfuración se espera un crecimiento más bajo del yeso natural.

Es claro que la demanda del yeso está íntimamente relacionada con la construcción, cuya demanda de prefabricados, yeso de construcción y de cemento es el principal factor que afecta al consumo del yeso. La actividad constructiva mundial ha venido creciendo de forma ininterrumpidamente en los últimos años y se espera que continúe en una tendencia similar en el futuro inmediato, lo que permite esperar que la industria del yeso continúe su crecimiento a un ritmo cercano al 2% anual.

La producción mundial de yeso se puede resumir de la siguiente manera:

Tabla A2.10 Producción mundial de yeso (2000)

Parte del mundo	Producción (millones de T)
Unión Europea	24,46
E.U.A, Canadá y México	35,04
Irán	11
China	6,8
Resto del mundo	33
Total	110,4

Fuente: (2002). *Panorama minero*. Recursos Minerales, Riesgos geológicos y Geoambiente. [En línea]. <http://www.igme.es/internet/RecursosMinerales/panoramaminero/m>.

Como se observa en la tabla A2.10 aunque no hay pleno consenso acerca de las cantidades producidas de yeso natural en el mundo, se puede estimar que ha tenido en los últimos años un aumento constante y que la producción haya pasado los 110 millones de toneladas donde el principal grupo de productores se sitúa en América del Norte.

El yeso *sintético* resulta de un subproducto de los sistemas de desulfuración empleados para reducir algunas emisiones sulfurosas de los centros productores de energía impulsados con carbón. El yeso sintético también se obtiene de otros sistemas neutralizadores de ácido de instalaciones industriales, esos sistemas no sólo cooperan a disminuir la contaminación aérea sino son también una confiable fuente proveedora de yeso puro [OLSON02].

Otro producto sintético en la industria del yeso es el *fosfoyeso* (Phospogypsum) que es un importante subproducto del ácido fosfórico empleado en la fabricación de fertilizantes que consiste en sulfato cálcico dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). El fosfoyeso contiene impurezas como materia orgánica, fosfato y álcalis que afectan de forma indeseada el fraguado y el endurecimiento de productos fabricados con este yeso sintético [SINGH95] por lo cual su uso de momento (2002) se restringe a la industria cementera como un retardante lo que produce problemas de almacenaje y de contaminación en los lugares donde se produce. Hay líneas de investigación que apuntan a la obtención de productos prefabricados para la construcción usando compuestos que incluyen fosfoyeso [KUMAR02].

El yeso sintético de desulfuración se produce en Norteamérica, Europa y Japón aunque su fabricación esta aumentando en países no desarrollados donde en el futuro se convertirá en un material primordial. El consumo de yeso de desulfuración aumentará su producción y ya en el año 2000 representó alrededor del 40% de la producción total de yeso natural lo que da indicios de su importancia [ROSKILL00].

A2.9 PRODUCCIÓN DE YESO EN EUROPA

La unión participó de la producción mundial en el año 2000 con alrededor del 22% del total del mundo y produjo para ese mismo año 24 millones de toneladas. Aunque varios países europeos han tenido ligeros descensos en sus producciones anuales, las tendencias positivas a la construcción y del consumo del cemento parecen indicar que durante los primeros años del siglo se producirán aumentos progresivos de la producción.

Es de especial interés para nuestra investigación señalar que la producción europea de placa de cartón se estimó para el año 2002 en 1200 millones de euros.

A2.10 PRODUCCIÓN DE YESO EN ESPAÑA

España es el líder europeo en la producción de yeso, principal exportador del continente y se encuentra entre los líderes de producción de yeso del mundo.

La producción española de yeso se encuentra bajo la operación de grandes empresas multinacionales europeas tales como la BPB (Británica y principal productor de España y Europeo), Uralita - Platres Lafarge (Francia), y Knauf (Alemania) con cantera y fábrica en Guixers (Lleida) la cual consume 240.000 T al año de yeso con una capacidad productiva de 150 T/h. Knauf produce actualmente alrededor de 27 millones de m² de placa de yeso y espera alcanzar próximamente los 30 millones de m² [CALVO04] de placas de yeso laminado. El trabajo desarrollado por esta empresa ha sido reconocida en el medio empresarial por su eficacia productiva y su trabajo de restauración minera. Dentro del mismo sector del mercado de productos de yeso encontramos a Uralita - Platres Lafarge con intereses en diversas ramas de los productos prefabricados, que dispone de varias instalaciones que le permiten atender el 25% del mercado nacional y a través de sus filiales, que comercializan la marca de productos de yeso Pladur de los cuales se produjeron (2001) 27 millones de m².

A las grandes empresas yeseras les acompañan pequeñas y medianas factorías repartidas en 12 autonomías y que aportan en conjunto un estimado del 10% del total de la producción del Estado.

La producción de yeso y productos de yeso en España se estimó para el año 2001 con la siguiente composición [IGME04]:

Tabla A2.11 Distribución estimada de la producción española de yeso (2001)

Tipo de producto	Cantidad (millones de T)
Yesos para enlucidos y recubrimientos	4,5
Prefabricados - placa.	0,513 equivalentes a 57 millones de m ²
Otros prefabricados (decoración y techos)	2,5
Yeso crudo exportación	4
Yeso para cemento	1,83
Total	13,35

Fuente adaptada de: Panorama Minero [IGME04] (en línea)

Por último el Plan de Investigación de Yesos realizado entre 1968 y 1989 por el IGME [2004] y al que se le suman investigaciones propias de las empresas explotadoras señalan a los investigadores que los recursos españoles en yeso se acercan a los 60.000 millones de toneladas, lo que permite afirmar que las reservas españolas de yeso son más que suficientes para asegurar su aprovisionamiento en un futuro a largo plazo.

A

ANEXO

3

**AVANCES PARA OTRAS
APLICACIONES. PASTAS**



Avances para otras aplicaciones. Pastas **A3**

ANEXO A.3 AVANCES PARA OTRAS APLICACIONES. Pastas

A3.1 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS PARA PASTAS DE YESO O ESCAYOLA CON RESIDUOS DE EPS PARA OTRAS APLICACIONES

Los trabajos que se describen en el Anexo A.3 quedan fuera de los alcances de esta tesis, sin embargo dada la relación que guardan con el tema de las mezclas de yeso o escayola con residuos molidos de EPS han sido incluidos en este documento. La información que aquí se ofrece está dirigida en especial hacia el desarrollo de futuros proyectos, entre los cuales destaca el desarrollo de una *pasta para guarnecidos* de muros con características de ligereza y ahorro de materiales vírgenes de yeso o escayola. La pasta está compuesta por el conglomerante-agua y residuos molidos de EPS en diferentes proporciones, lo que ofrece diferentes propiedades en las pastas y que requerirán de un acabado o enlucido fino.

La actividad experimental se llevó a cabo en el taller de Modelos del Departamento de Proyectos de Ingeniería y en los Laboratorios de Resistencia de Materiales de la UPC.

A3.1.1 INTRODUCCIÓN

Mediante los trabajos de experimentación hechos durante la tesis se ha comprobado que es posible el uso de mezclas de residuos molidos de EPS conglomerados con yeso o escayola para la obtención de placas y paneles para la construcción.

Del análisis de los apartados 6.2 y 6.3 de esta tesis se desprende que varias mezclas experimentadas se pueden aprovechar en otras aplicaciones además de los de placas y paneles para la construcción. Estas aplicaciones pueden ser como pastas para guarnecidos de muros o para el moldeo de elementos decorativos aligerados de yeso o escayola, como molduras y remates para techos (capítulo 3, apartado 3.2.2.2.c). Para determinar las características de las mezclas es necesario hacer diversos ensayos de los cuales aquí se practican algunos.

Los resultados que aquí se exponen son además un cuerpo de conocimientos útiles para futuras investigaciones que se relacionan al tema de la tesis y por lo tanto han sido incluidas en este documento a manera de Anexo.

Para cooperar a obtener un perfil técnico de las mezclas se ha decidido la realización de tres ensayos a las probetas de residuos de EPS con yeso o escayola:

- Ensayo de compresión
- Ensayo de densidad aparente
- Ensayo de flexión

Para concluir el perfil técnico quedan por practicarse los ensayos a la tracción, a la adhesividad y a la conductividad térmica de las mezclas 42, 44, 45 y 49.

Para sistematizar la información, cada uno de los ensayos aplicados se ordenan en subtemas y contienen los siguientes apartados:

- Descripción
- Resultados del ensayo
- Análisis de resultados
- Conclusiones del ensayo

Al final de los tres ensayos se ofrece un grupo de conclusiones relativas al conjunto de ensayos aplicados a las probetas de yeso o escayola con residuos de EPS.

A3.1.2 OBJETIVOS

- El objetivo de este avance es establecer un perfil técnico de las mezclas 42, 44, 45 y 49 para su uso en aplicaciones diferentes a las estudiadas en el apartado 6.2.
- Se busca verificar las posibles aplicaciones de estas mezclas en pastas para guarnecidos o para pastas de moldeo.
- Establecer comparaciones entre los resultados de los ensayos de mezclas con residuos molidos de EPS con la normativa española. También se establecen relaciones de los resultados obtenidos en esta tesis con los trabajos de especialistas en yeso y escayola.

A3.1.3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Los ensayos demandaron de dos tipos de probetas:

1. Probetas de referencia (R):

Probetas elaboradas con las mismas relaciones de yeso/agua de las mezclas seleccionadas, pero que no contienen residuos de EPS.

2. Probetas de yeso o escayola conglomeradas con residuos de espuma de EPS.

Todas las probetas se fabricaron en el taller del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la UPC.

A3.1.3.1 Descripción

Las dimensiones de las probetas para los ensayos aplicados en este anexo son determinadas por las normas utilizadas para cada caso. Sus características se describen en la tabla A3.1.

Tabla A3.1 Dimensiones de las probetas ensayadas en el apartado A3

Ensayo	Longitud l (mm)	Anchura b (mm)	Espesor d (mm)
Flexión	160	40	40
Densidad aparente	400	300	12,5
Compresión	50	40	40

Las fórmulas de cada probeta fabricada y sus características se expresan en la descripción que acompaña a cada ensayo.

A3.1.3.1.a Equipo

El equipo básico empleado para la fabricación de las probetas se describe en el capítulo 6, apartado 6.1.2.1.a. de esta tesis.

Para la fabricación de las probetas se utilizaron diferentes moldes y utillajes dependiendo del ensayo que se tratara que se describen a continuación:

- a. Molde rectangular para la fabricación de probetas para el ensayo de densidad aparente:

Características:

Fabricado de solera metálica de 5 mm de espesor

Cavidad de 400 x 300 x 12,5 mm

Tapa metálica de 400 x 300 x 1,5 mm

Placa de vidrio de 650 x 650 x 9 mm

- b. Molde desarmable de tres cavidades para la fabricación de paralelepípedos del ensayo de flexión y compresión.

Características:

Molde desarmable metálico, provisto de sistemas de sujeción mecánicos

Tres cavidades de 40 x 40 x 160 mm cada una

Placa metálica para soporte de fondo de 250 x 250 x 10 mm

A3.1.3.1.b Materiales

Los materiales para la fabricación de las probetas se describen en el capítulo 6, apartado 6.1.2.1.b. El procedimiento general para la fabricación de las probetas es el mismo usado para todos los ensayos y se especifica en el capítulo 5, apartado 5.1.1.4.f.

A3.1.4 METODOLOGÍA

Para establecer un perfil de las propiedades de las mezclas aligeradas que se ensayan en este anexo se ha escogido un grupo de tres ensayos básicos, que atienden las especificaciones de las normas UNE, UNE-EN-ISO y la normativa sobre yesos y escayolas (RY-85).

Las probetas se han ensayado bajo las mismas condiciones de laboratorio de manera que resulte válida la comparación entre los materiales que sirven de testigo y las probetas

fabricadas con yeso o escayola conglomeradas con EPS. Se consideran también los datos obtenidos en la literatura técnica al respecto de las propiedades específicas, investigadas con antelación.

La descripción de la interpretación de las fórmulas condensadas específicas que se usaron para la fabricación de las probetas se describen en el apartado 6.1.3.1.

A3.1.5 ENSAYO DE COMPRESIÓN

A3.1.5.1 Descripción

Cuando se aplica una fuerza a un material éste se deforma. Cuando la fuerza empuja sobre la probeta, ésta se acorta y se produce una compresión.

Se busca establecer las resistencias a la compresión que tienen los materiales fabricados con residuos de espuma de EPS conglomerados con yeso o escayola, y compararlos con los materiales hechos de yeso o escayola únicamente.

A3.1.5.1.a Norma utilizada UNE 102031:1999

El ensayo se ha basado en la Norma Española UNE 102031:1999 *Yesos y Escayolas de Construcción. Métodos de Ensayos Físicos y Mecánicos*. Esta norma se especifica en el *Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en obras de construcción*. En dicho pliego se definen los tipos usuales de yesos y escayolas en la construcción y sus características.

A3.1.5.1.b Equipo

Se han utilizado las siguientes herramientas y los aparatos que señala la norma:

Amasadora

Espátula

Molde de acero desarmable de tres compartimientos

Desecador

Prensa de ensayo de compresión marca LERMA® con capacidad de carga superior a (10 ± 0,1) kN dotada con platos rotulados

Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 200 kg

Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 500g kg

Captador de fuerza LERMA® con capacidad de 2000 kg

Medidor de desplazamiento Novotechnik® TR-50 de 50 mm

A.3.1.5.1.c Preparación de las probetas

Para estas probetas se usan probetas prismáticas con una sección de 40 x 40 mm como lo indica la norma; no especifica la altura de las mismas e inclusive señala que es posible usar las partes de las probetas usadas en un ensayo de flexión, si éste ya se ha realizado con anterioridad. Las probetas para este ensayo se han producido de yeso o escayola amasados con agua únicamente y de materiales con agregados de residuos de espuma de EPS molidos y que se han seleccionado en la primera etapa experimental:

Tabla A3.2 Características de las probetas a ensayar a la compresión

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
R(42-44)	Yeso controlado 100% + agua 120%	YC100+A 120
R(45)	Escayola 100% + agua 120%	E100+A 120
R(49)	Yeso Rápido 100% + agua 80%	YR100+A 80
42	Yeso controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC100+A 120+MG 2
44	Yeso controlado 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	YC100+A 120+MG 3
45	Escayola 100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E100+A 120+ MG 3
49	Yeso Rápido 100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR100+A 80+ MG 1,6

Se produjeron al menos tres probetas de cada mezcla atendiendo las dimensiones que señala la Norma UNE 102031:1999 *Yesos y escayolas métodos de ensayo físicos y mecánicos*. Debido a las características de las mezclas algunas probetas formuladas con espuma como agregado sufrieron deformaciones en sus esquinas, aristas y caras durante su extracción del molde. Cuando esto sucedió se asentó en las notas correspondientes al ensayo y se consideró durante los análisis.

Las probetas se prepararon y manejaron dentro del rango de condiciones de temperatura y humedad que marca la norma, $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y $(50 \pm 5) \% \text{ HR}$ hasta la realización del ensayo. El ensayo se ha realizado en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la UPC.

A3.1.5.1.d Procedimiento

Posterior al moldeo de las probetas y de extracción de los moldes se han ejecutado los siguientes pasos:

1. Secar hasta masa constante ($\pm 10 ^\circ\text{C}$); si la prueba no se realiza inmediatamente mantener las probetas dentro de las condiciones que marca la norma.
2. Inspeccionar cada probeta.
3. Medir cada lado de la sección y la altura de los prismas.
4. Colocar las probetas con sus caras laterales (sección de 40 x 40 mm) entre los platos de la máquina de compresión y aplicar una carga hasta lograr la rotura de la pieza.

Posteriormente se ha calculado la Resistencia Mecánica a la Compresión de cada probeta (σ_c) mediante la fórmula que señala la norma en el punto 8.3. Expresión de resultados en N/mm^2 que viene dada por:

$$\sigma_c = P (N) / 1600 (\text{mm}^2)$$

Donde:

σ_c Es la resistencia mecánica a la compresión en N/mm^2

P Es la carga de rotura en Newtons N

Finalmente se han tabulado los resultados individuales y se han calculado los promedios correspondientes por tipo de mezcla.

A.3.1.5.2 Resultados del ensayo de compresión

Los resultados del ensayo por probeta se describen en la tabla A3.3.

Tabla A3.3 Resultados por probeta del ensayo a la compresión

Clave de probeta	Carga (kg)	Carga P (N)	σ_c N/mm^2
R (42-44) - 1	268,6	2632,3	1,6
R (42-44) - 2	271,7	2662,7	1,7
R (42-44) - 3	263,7	2584,3	1,6
R (45) -1	727,8	7132,4	4,5
R (45) -2	742,5	7276,5	4,5
R (45) -3	638,2	6254,4	3,9
R (49) - 1	1053,2	10321,4	6,5
R (49) - 2	1069,4	10480,1	6,6
R (49) - 3	1187,0	11632,6	7,3
42-1	77,2	756,6	0,5
42-2	62,6	613,5	0,4
42-3	80,9	792,8	0,5
44-1	79,0	774,2	0,5
44-2	90,0	882,0	0,6
44-3	88,0	862,4	0,5
45-1	111,4	1091,7	0,7
45-2	156,8	1536,6	1,0
45-3	91,8	899,6	0,6
45-4	116,9	1145,6	0,7
49-1	197,9	1939,4	1,2
49-2	237,8	2330,4	1,5
49-3	265,5	2601,9	1,6
49-4	199,8	1958,0	1,2

Los resultados promedio por mezcla que participaron en el ensayo de compresión se describen en la tabla A3.4:

Tabla A3.4 Resultados de resistencia a la compresión (σ_c) en N/mm² promedio por tipo de mezcla

Mezcla	Fórmula (% en peso)	σ_c (N / mm ²)
R (42-44)	Yeso controlado100%+A 120%	1,6
R (45)	Escayola100%+A 120%	4,3
R (49)	Yeso rápido100%+A 80%	6,8
42	Yeso controlado100+A 120% + MG 2%	0,5
44	Yeso controlado100%+A 120% + MG 3%	0,5
45	Escayola100%+A 120% + MG 3%	0,7
49	Yeso rápido100%+A 80% + MG 1,6%	1,4

A.3.1.5.3 Análisis de resultados del ensayo de compresión

Probetas con yeso o escayola y agua de amasado únicamente.

En la tabla A3.5 los valores obtenidos en el ensayo se comparan con datos que proceden de otros investigadores. Como se observa hay diferencias en las cifras generados en este ensayo con los trabajos de otros autores, aunque también se encuentran desigualdades entre ellos mismos. Estas discrepancias pueden deberse al uso de materiales distintos o a pequeños cambios en los procedimientos durante los ensayos. Sin embargo podemos observar que hay una relación semejante de proporciones entre nuestros valores y los datos obtenidos por uno de los autores de la tabla y por los datos de los fabricantes de yeso y escayola.

Tabla A3.5 Comparativo de valores obtenidos para el ensayo de resistencia a la compresión de yeso o escayola-agua

Características de la mezcla	Arredondo ¹ (N/mm ²)	Villanueva ² (N/mm ²)	González Madariaga ³ (N/mm ²)
Yeso de construcción 0,6 (Y100+A60)	11,7	15,5	-
Yeso de construcción 0,8 (Y100+A80)	8,428	-	6,5 – 7,3
Yeso de construcción 1,2 (Y100+A120)	2,3	-	1,6 – 1,7
Escayola 1,2 (E100+A120)	5,7	-	3,9 – 4,5

1. Arredondo y Verdú, F. (1991). *Yesos y cales*. Madrid: E.T.S. Ing. de caminos. p. 29

2. Villanueva, D. L; García, S. A. (2002). *Manual del yeso*. Madrid: ATEDY. p. 69

3. Resultados del este ensayo

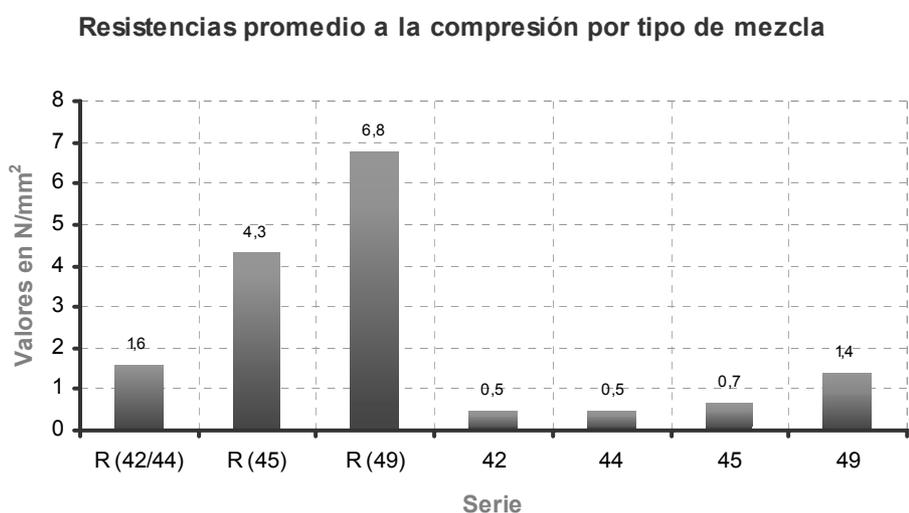
Por otro lado es notoria la escasez de información acerca de resistencias en cuerpos endurecidos de yeso y escayola en las proporciones mayores al 80% de agua de amasado. Una razón para ello puede ser que a mayor presencia de agua en la mezcla desciende la resistencia del producto, lo cual es indeseable para las aplicaciones tradicionales del

conglomerante, cuya preparación usualmente no usa más de la relación 80% de agua de amasado.

La mayor resistencia promedio del ensayo a la compresión se obtuvo en las probetas fabricadas de yeso rápido con una relación de 80% en peso de agua de amasado R (49) con 6,8 N/mm². Por otra parte la menor resistencia con 1,6 N/mm² se obtuvo en las probetas fabricadas con yeso controlado al 100% y 120% en peso de agua de amasado clave R (42-44).

La resistencia más alta se da en la mezcla con menor presencia de agua de amasado, lo cual se puede atribuir a menos poros que resultan de la migración del exceso agua libre durante el fraguado y el endurecido de la probeta. A más cantidad de agua de amasado, mayor porosidad, y menos compactad, densidad y resistencia del producto [VILLAN01].

Entre mezclas de diferentes conglomerantes e iguales factores de agua de amasado, la Escayola100+A120 supera en más del 60% al Yeso Controlado100+A120 y motivo para ello puede ser el de un molido más fino y a la formación más compacta de la escayola. También la diferencia puede darse por el uso de retardadores de fraguado como los coloides que retrasan la formación de cristales.



Gráfica A3.1 Comparación de la resistencia a la compresión promedio por tipo de mezcla

Por lo que respecta a la forma de la fractura que se produjo en las probetas sin la presencia de agregados de espuma, en lo general esta se dio en el sentido de la aplicación de la fuerza y con poca ramificación en la fractura principal.

Probetas con residuos de espuma de EPS

Los valores alcanzados en las mezclas con agregados de espuma resultan en todos los casos menores a los de las mezclas sin residuos. El valor máximo promedio conseguido en estas probetas es de 1,4 N/mm² para la mezcla (49) de Yeso rápido100+A80+MG1,6 y que además es la única de la serie con esa relación de agua de amasado.

Las tres mezclas restantes 42, 44 y 45 ofrecen datos más homogéneos que van de 0,5 a 0,7 N/mm². Como se observa, la diferencia en las mezclas 42 y 44 son sólo los porcentajes de residuos usados, (2% y 3% respectivamente) y lo que en apariencia no impactan los resultados obtenidos.

A diferencia de los materiales sin agregados de espuma, en estas mezclas las fracturas en las probetas se dieron muy ramificadas, sin la presencia de una grieta mayor y transversales a la posición de la aplicación de la fuerza, a similitud de capas que colapsan unas sobre otras. Esto se puede atribuir a la distribución de las perlas del residuo de EPS en la mezcla.

A.3.1.5.4 Conclusiones del ensayo de compresión

- Se ha aplicado la prueba con éxito en dos grupos de materiales; uno de conglomerantes de yeso o escayola fraguados con agua únicamente, y otro grupo de los mismos conglomerantes adicionados con residuos de espuma de EPS. En este último grupo las proporciones de residuo y agua varían según la mezcla ensayada.
- En algunos casos los resultados del ensayo muestran discrepancias hasta de un 23% con los datos obtenidos en la investigación preliminar. Sin embargo en la mayoría de los resultados se acercan o coinciden con la información disponible, en especial la que ofrecen los fabricantes de yeso o escayola. Así, consideramos que la información generada en el ensayo es confiable y útil.
- El ensayo ha permitido comprobar que la resistencia a la compresión de las mezclas ensayadas sin la presencia de residuos, desciende de forma muy notoria al aumentar la cantidad de agua de amasado. Esta disminución se explica por el aumento de porosidad en el cuerpo endurecido y que resulta de la migración de agua líquida o humedad al medio después del fraguado.
- Podemos señalar por ejemplo, que la pérdida de resistencia a la compresión que reporta la mezcla de Yeso controlado 100+A80 ó YC 0,8, la cual pierde cerca de un 76,5% cuando es amasada con una relación de 120% de agua.
- Las mezclas con residuos de espuma confirman las conductas originales de los conglomerantes con las que están hechas y la importancia de la relación de cantidad de agua de amasado empleada en su fabricación.
- Las mezclas ensayadas de yeso o escayola con residuos de espuma de EPS muestran valores de resistencia a la compresión aún menores que las de las mezclas que no tienen plástico en los cuerpos fraguados. Esto se explica por una alta proporción de agua de amasado en la mezcla y a la presencia de los residuos de EPS, condiciones que en conjunto ofrecen un material sumamente poroso, que pueden dar valores de resistencia entre el 16% y el 31,3% comparados con los que obtienen las mismas mezclas sin la presencia de espuma.
- No se reflejan diferencias notorias de resistencia entre mezclas con los mismos conglomerantes y relación de amasado pero con diferentes factores de residuos. Esto puede indicar que pequeños cambios en las cantidades de espumas presentes en las mezclas no modifican sustancialmente sus valores de resistencia a la compresión.

A3.1.6 ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE

A.3.1.6.1 Descripción

El ensayo consiste en la determinación de las densidades aparentes de las mezclas seleccionadas cuando se encuentran endurecidas y secas. Las densidades aparentes se obtienen a través de la relación que existe entre su masa y su volumen. El experimento tiene como fin, el de establecer una comparación entre las densidades de los tipos de materiales en estudio y las densidades de los materiales similares usados en la construcción.

A.3.1.6.1.a Norma utilizada UNE 102035

El ensayo se ha adaptado de la Norma Española UNE 102 035 *Placas de yeso laminado métodos de ensayo*. Se ha utilizado esta norma debido a la similitud de las aplicaciones que se da entre los materiales que se analizan y de los usados en la construcción.

A.3.1.6.1.b Equipo

Se ha utilizado el siguiente instrumental referidos en la norma:

Pie de rey o vernier marca Mitutoyo® para la determinación de los espesores con lecturas mínimas de 0,1 mm

Balanza de precisión marca Sartorius® con lecturas de aproximación a 0,1 g

Horno de secado marca Selecta®, temperatura máxima de 90 a 100 °C

Flexómetro con una graduación mínima de 1,0 mm

A.3.1.6.1.c Preparación de las probetas

Las probetas corresponden a las mezclas seleccionadas en la primera etapa experimental y que se muestran en la tabla A3.6.

Tabla A3.6 Características de las probetas del ensayo de densidad aparente

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
42	Yeso controlado100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC 100+A 120+MG 2
44	Yeso controlado100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	YC 100+A 120+MG 3
45	Escayola100% + agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E 100+A 120+MG 3
49	Yeso rápido100% + agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR 100+A 80+MG 1,6

Para este ensayo se han aprovechado y se han acondicionado las probetas fabricadas para otras pruebas. Las dimensiones de las probetas fueron de 12,5 x 300 x 400 mm (± 1 mm).

Las probetas de placa de yeso se produjeron a similitud de las placas de yeso que actualmente se ofrecen en el mercado, esto es, que a los núcleos de yeso o escayola se les recubrió con cartón gris monocapa tanto en su cara como en su dorso, ambos lienzos con espesor de 0,45

mm. Para este ensayo a las probetas se les desprendió de los cartones de ambas caras procurando el mínimo daño a las superficies afectadas.

Previamente al ensayo se han observado y atendido los aspectos de acondicionamiento de las probetas señaladas en la misma norma, y que consiste en introducirlas dentro de una cámara con temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y $(50 \pm 5) \%$ de humedad relativa hasta que se ha comprobado la masa constante de las probetas (± 10 g). Posteriormente las probetas se han mantenido en atmósfera de laboratorio hasta la realización de la prueba. El ensayo se ha realizado en el taller del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la UPC.

A.3.1.6.1.d Procedimiento

Una vez obtenido la masa constante de cada probeta se han ejecutado los siguientes pasos:

1. Pesar cada probeta al menos tres veces consecutivas.
2. Medir con pie de rey o vernier los dos largos y los dos anchos de cada placa.
3. Calcular la densidad de cada probeta.

Para los fines de nuestra investigación los cálculos se realizaron usando la expresión:

$$\rho = (m/V) \times 10^6$$

Donde:

ρ Es la densidad aparente de una placa de yeso y escayola en kg/m^3

m Es el promedio de los resultados de las pesadas consecutivas de cada probeta en g

V Es el promedio del volumen de cada probeta en mm^3

El volumen (V) de cada probeta en mm^3 , resulta de multiplicar el promedio de sus longitudes (l_x) por el promedio de sus anchos (b_x) por el promedio de sus cuatro espesores (d_x); todas las mediciones expresadas en mm.

La densidad aparente (ρ) de una probeta de yeso o escayola con agregados de residuos de EPS se ha obtenido entonces, dividiendo el promedio de las mediciones de su masa (m_x) expresada en g, entre su volumen promedio (V) expresado en mm^3 . Después, para un manejo más cómodo el resultado se ha convertido a kg/m^3 (tabla 5).

Finalmente se ha obtenido la densidad (ρ) de cada mezcla calculando la media aritmética de los promedios de las densidades de cada probeta del mismo tipo, en kg/cm^3 .

A.3.1.6.2 Resultados del ensayo de densidad aparente

Una vez practicada la medición de las probetas los resultados se tabularon y depuraron para su manejo más sencillo. A continuación se muestran los resultados del ensayo:

También durante la experimentación se han realizado las mismas mediciones y cálculos con probetas fabricadas con materiales que llamamos *de referencia* (R), los cuales han sido preparadas y acondicionadas de idéntica manera pero que no tienen residuos de espuma de EPS integrados.

Tabla A3.7 Resultados individuales de la medición de la masa y sus promedios por probeta

Probeta	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	m_4 (g)	m_x (g)	m_x (kg)
R (42-44) 1	1247	1248	1248	-	1247,7	1,248
R (42-44) 2	1242	1242	1242	-	1242,0	1,242
R (49) 1	1651	1652	1652	-	1651,7	1,652
R (49) 2	1643	1642	1642	-	1642,4	1,642
R (45) 1	1375	1374	1375	-	1374,7	1,375
R (45) 2	1369	1369	1368	-	1368,7	1,369
42-1	689	689	689	690	689,3	0,689
42-2	604	604	605	604	604,3	0,604
42-3	698	698	699	698	698,3	0,698
44-1	619	618	618	619	618,5	0,618
44-2	557	557	549	549	553,0	0,553
44-3	561	561	560	561	560,8	0,561
44-4	582	582	581	582	581,8	0,582
044-5	587	586	587	586	586,5	0,586
044-6	606	606	606	605	605,8	0,606
45-1	569	569	568	529	558,8	0,559
45-2	552	552	552	553	552,3	0,552
45-3	568	569	568	569	568,5	0,568
45-4	587	587	588	587	587,3	0,587
45-5	581	581	582	582	581,5	0,581
45-6	607	607	607	608	607,3	0,607
45-7	630	630	631	631	630,5	0,630
49-1	802	802	801	801	801,5	0,801
49-2	857	858	857	858	857,5	0,857
49-3	862	862	862	863	862,3	0,862

Tabla A3.8 Medición de los espesores de los lados de cada probeta y sus promedios

Probeta	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_4 (mm)	d_5 central (mm)	d_x (mm)
R (42-44) 1	11,2	11,6	11,9	11,3	11,5	11,5
R (42-44) 2	12,6	12,3	11,3	11,6	11,6	12,0
R (49) 1	12,3	10,9	12,2	11,6	11,8	11,8
R (49) 2	12,2	11,9	12,2	11	12,2	11,8
R (45) 1	11,4	12,6	12,2	12,6	12,3	12,2
R (45) 2	9,8	11,9	13,1	12,9	11,9	11,9
42-1	11,6	10,7	11,7	10,7	11,2	11,2
42-2	9,9	9,8	10,45	10,3	10,1	10,1
42-3	12,2	9,5	12,2	12,3	12,1	11,7
44-1	12,12	12,11	11,18	11,18	11,6	11,6
44-2	12,12	12,3	11,7	11,18	11,8	11,8
44-3	12,1	12,11	11,18	11,18	11,6	11,6
44-4	12,95	9,7	11,7	12,45	11,7	11,7
44-5	13,4	11,2	12	12,5	12,3	12,3
44-6	13,1	10,7	11,8	11,35	11,7	11,7
45-1	11,9	11,9	12,11	12,12	12,0	12,0
45-2	12	11,9	12,11	12,12	12,0	12,0
45-3	11,9	11,9	12,2	12,12	12,0	12,0
45-4	11,9	11,9	12,11	12,12	12,1	12,0
45-5	11,6	12	11,55	11,65	11,7	11,7
45-6	11,65	11,9	11,4	11,8	11,7	11,7
45-7	11,9	11,4	10,65	11,4	11,3	11,3
49-1	12,7	12,1	13,9	11,7	12,6	12,6
49-2	12,7	12,4	13,3	13,5	12,7	12,9
49-3	12,9	11,6	14,6	12,9	13,0	13,0

Tabla A3.9 Medición de largos y anchos de las probetas

Probeta	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_x (mm)	b_1 (mm)	b_2 (mm)	b_x (mm)
R (42-44) 1	399	399,5	399,3	299,5	300	299,8
R (42-44) 2	398,5	399,5	399	299	301	300,0
R (49) 1	399,5	399	399,3	300	301	300,5
R (49) 2	399	399,5	399,3	299,5	300	299,8
R (45) 1	400	401	400,5	299,5	299,5	299,5
R (45) 2	400	401	400,5	299	299,5	299,3
42-1	399,5	399,7	399,6	299	300	299,5
42-2	399,5	399	399,25	299	300	299,5
42-3	399,5	400	399,75	299,5	299	299,3
44-1	399	400	399,5	299	301	300,0
44-2	399	400	399,5	299	299	299,0
44-3	398	399	398,5	297	299	298,0
44-4	399	400	399,5	299	301	300,0
44-5	398	399	398,5	297	299	298,0
44-6	399	400	399,5	299	299	299,0
45-1	399,5	400,5	400	298	300	299,0
45-2	399,5	400,5	400	298	300	299,0
45-3	399	399,5	399,25	297,5	300	298,8
45-4	399,5	400,5	400	299,5	300	299,8
45-5	399,5	400,5	400	298	300	299,0
45-6	399	399,5	399,25	297,5	300	298,8
45-7	399,5	400,5	400	299,5	300	299,8
49-1	399	400	399,5	299	300	299,5
49-2	399	400	399,5	299	300	299,5
49-3	399	400	399,5	299,5	299	299,3

Tabla A3.10 Masa, volumen y densidad promedios de cada probeta

Probeta	m_x (kg)	V (m ³)	ρ (kg/m ³)	ρ (g/cm ³)
R (42-44) 1	1,25	0,0014	906,45	0,91
R (42-44) 2	1,24	0,0014	868,28	0,87
R (49) 1	1,65	0,0014	1171,50	1,17
R (49) 2	1,64	0,0014	1160,38	1,16
R (45) 1	1,37	0,0015	939,37	0,94
R (45) 2	1,37	0,0014	957,64	0,96
42-1	0,69	0,0013	515,4	0,51
42-2	0,60	0,0012	499,7	0,50
42-3	0,70	0,0014	500,6	0,50
44-1	0,62	0,0014	443,1	0,44
44-2	0,55	0,0014	391,5	0,39
44-3	0,56	0,0014	405,6	0,41
44-4	0,58	0,0014	414,9	0,42
44-5	0,59	0,0015	402,3	0,40
44-6	0,61	0,0014	432,0	0,43
45-1	0,56	0,0014	389,1	0,39
45-2	0,55	0,0014	383,8	0,38
45-3	0,57	0,0014	396,2	0,40
45-4	0,59	0,0014	407,3	0,41
45-5	0,58	0,0014	415,6	0,42
45-6	0,61	0,0014	435,6	0,44
45-7	0,63	0,0014	463,8	0,46
49-1	0,80	0,0015	531,6	0,53
49-2	0,86	0,0015	554,7	0,55
49-3	0,86	0,0016	554,8	0,55

Tabla A3.11 Resultados de la densidad aparente promedio de cada serie ensayada

mezcla	Fórmula	ρ (kg/m ³)	ρ (g/cm ³)
R (42-44)	Yeso controlado100+A 120	887,36	0,89
R (49)	Yeso rápido100+A 80	1165,94	1,17
R (45)	Escayola100+A 120	948,51	0,95
42	Yeso controlado100+A 120 + MG 2	505,22	0,50
44	Yeso controlado100+A 120 + MG 3	414,90	0,41
45	Escayola100+A 120 + MG 3	413,04	0,41
49	Yeso rápido100+A 80 + MG 1,6	547,05	0,55

A.3.1.6.3 Análisis de resultados del ensayo de densidad aparente

El ensayo realizado ha arrojado información acerca de la densidad aparente en dos tipos de materiales:

A. Mezclas secas de yesos o escayola y agua, sin agregados de residuos de poliestireno expandido (EPS)

Estas probetas (R) tienen la intención de servir como referencia a los materiales que sí contienen residuos de espuma de EPS en su formulación. Los resultados obtenidos se comparan con informaciones generadas por otros autores que se exponen en la tabla A3.12.

Tabla A3.12 Comparación de las densidades aparentes de yeso de construcción y de escayola según diversos autores (g/cm³)

Relación agua/yeso en peso	C.S.T.B ¹	Blancher ²	Sastre R ³	Arredondo ⁴	Villanueva ⁵	González Madariaga
Yeso 0,6	1,15	1,2	-	1,3	1,1	1,19
Yeso 0,8	1,0	1,0	1,25	1,02	1,0	1,16 – 1,17
Yeso 1,2	-	-	-	0,79	0,75	0,87 - 0,91
Escayola 0,6	-	-	-	-	-	1,22
Escayola 0,8	-	-	-	-	-	1,01
Escayola 1,2	-	-	-	-	-	0,94 - 0,96

1. Datos tomados del S.N.F.I.P. *Chaiers Techniques*. París 1973-1974. De Villanueva Luis de. *Documentación técnica de las propiedades del yeso*. Madrid 1975 p 6

2. Blanchere L. (1967) *Construir*. Barcelona. De Villanueva. op. cit. p 6

3. Sastre, R. (2000). *Propietats dels materials i elements de construcció*. Barcelona: Edicions UPC. p. 21.

4. Arredondo, F. (1991). *Yesos y cales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de caminos. p. 30.

5. Villanueva, L; García, A. (2001). *Manual del yeso*. Madrid: ATEDY. p. 65.

Como se muestra en la tabla A3.12, aunque parece que no hay pleno consenso entre los investigadores acerca de las densidades aparentes obtenidos de los rehidratos de yeso y escayola, los datos sí muestran valores que tienden a ser similares entre ellos. Es notoria la escasa información disponible al respecto de mezclas con relaciones de agua-yeso mayores de 100%; los autores parecen concentrarse en aquellas proporciones usuales en la industria de la construcción y que van de 60% a 80% en peso.

Las densidades obtenidas en esta experimentación en ocasiones se apartan hasta en un 16% de los valores de otros autores, quedando por debajo de algunos o excediendo a otros. Las razones pueden ser varias, entre ellas el uso de materiales comerciales para las muestras o errores durante la fabricación y manipulación de las mismas.

Para la elaboración de las probetas se usaron materiales disponibles al menudeo lo cual sujetó el experimento a las características determinadas por el fabricante. La oferta de tipos de yesos y escayolas comerciales para la construcción es amplia y cada una de ellas tiene diversas formulaciones que no están disponibles al público. Aunque se buscó usar materiales simples; cualquier aditivo o agregado en ellos puede producir una variación en los resultados.

Por otra parte los autores de los datos expuestos sólo mencionan en sus reportes el uso de *yesos de construcción* más no se ofrecen detalles acerca de los mismos y de otros factores que pueden afectar las densidades reportadas, como pueden ser la piedra de origen, la mezcla particular de semihidratos e hidratos y su proceso de producción. La diferencia también pudo producirse debido a errores durante la fabricación y la manipulación de las muestras.

Por lo que respecta a los resultados de la tabla A3.13 se pueden extraer las siguientes observaciones:

Tabla A3.13 Densidad aparente por tipo de conglomerante y composición

Conglomerante	Proporción de residuos presentes en las mezclas			
	Mezcla sin residuos (kg/m ³)	EPS MG:1,6 (kg/m ³)	EPS MG:2 (kg/m ³)	EPS MG:3 (kg/m ³)
Yeso R100+A 80	1165,94	547,05	-	-
YC100+A 120	887,36	-	505,22	414,9
Escayola100+A 120	948,5	-		413.04

La reducción de densidades entre yesos sin residuos de espuma resulta de 24% menos del yeso controlado 120 (YR100+A120) con relación al yeso rápido 80 (YR100+A80). Este beneficio se logra simplemente aumentando la cantidad de agua de amasado.

Las reducciones también se dan entre el yeso rápido y la escayola que amasados con proporciones de agua diferentes hacen esperar esa reducción, la cual resulta en 19% favorable para la escayola.

Para relaciones de agua de amasado iguales entre yesos y escayolas la menor densidad aparente se da en el yeso controlado 1,2 con un 7% menos que la escayola. A este resultado pueden contribuir el mayor índice de pureza de la escayola empleada (90-92%) contra el del yeso de construcción (75-80%) además de las finuras de su molido (retención en tamiz del 5 y 15% respectivamente) [ARREDO91].[UNE7050].

B. Mezclas secas de yesos o escayola y agua, más agregados de residuos de poliestireno expandido (EPS).

De la tabla A3.12, el uso de las espumas como agregados produjo significativas disminuciones en la densidad aparente de las mezclas donde participan, en comparación con las mezclas que no contienen residuos del plástico:

Para el yeso rápido con una relación de agua-yeso del 80% y con un porcentaje del 1,6% en peso de espuma, se obtuvo una disminución equivalente al 53,1% en relación al peso de la formulación sin plástico.

En las probetas fabricadas con yeso de fraguado controlado con una relación del 120% de agua y con 2% de residuos de EPS en peso, se obtuvo una disminución del 44% en comparación con el peso del producto sin espuma. Para la misma relación de agua y con 3% de espuma de EPS la disminución en la densidad fue del 53%.

La escayola E-35 fue otro conglomerante usado con una relación de agua-yeso de 120%, con una presencia de espuma de 3% en peso. En la mezcla se obtuvo una disminución de la densidad del 56%. (mezcla 45 contra mezcla R (45)).

Tabla A3.14 Beneficios en las densidades aparentes de los productos ensayados con relación al factor de espuma de EPS presente en la mezcla

Conglomerante	Beneficio			
	Mezcla sin residuos (%)	EPS MG:1,6 (%)	EPS MG:2 (%)	EPS MG:3 (%)
Yeso rápido 80 ó 0,8 (YR100+A 80)	0	53,1		
Yeso controlado 120 ó 1,2 (YC 100+A 120)	0	-	43,1	53
Escayola 120 ó 1,2 (E100+A 120)	0	-		56

Como se observa en la tabla A3.14, en las mezclas con agregados de espuma se obtuvieron beneficios similares en las densidades con los mismos componentes de agua de amasado y residuos aunque diferente conglomerante, como es el caso del yeso controlado 120 y la escayola 120 con un 3% de residuos de espuma de EPS, donde las disminuciones de densidades fueron de 53 y 56 % respectivamente.

Para los casos de el yeso acelerado 0,8 y el yeso controlado 1,2 con diferentes cantidades de agua de amasado y proporción de residuos (1,6% y 2%) la disminución de densidades son 10 puntos porcentuales.

A.3.1.6.4 Conclusiones del ensayo de densidad aparente

Se han ensayado dos grupos de materiales, uno de conglomerantes amasados con agua únicamente y otro grupo fabricado con los mismos conglomerantes y relaciones de agua de amasado pero con agregados de residuos de espuma de EPS. El fin fue el de establecer una comparación simple de densidades aparentes entre los dos grupos de probetas.

- La poca información disponible acerca de la densidad de los materiales endurecidos de yeso o escayola, sugieren que esta propiedad no representa un interés mayor para la industria dadas las aplicaciones usuales de los conglomerantes.
- Las proporciones de agua usados en la fabricación de las probetas son poco comunes en la información recolectada en la investigación preliminar. Los datos obtenidos del ensayo a la densidad de las probetas sin residuos de espuma, muestran diferencias que van del 6 al 16% con relación con los trabajos de otros investigadores. Sin

embargo los datos aportados por esos autores también indican diferencias entre ellos mismos.

- El ensayo ha comprobado que es posible disminuir de forma significativa la densidad de un cuerpo fraguado de yeso o escayola, mediante un aumento en la proporción de agua de amasado empleada en su fabricación; en las mezclas ensayadas las pérdidas de masas oscilaron entre el 18,6% y el 23,9%. Esto se explica por un aumento de porosidad de la probetas con esas características. Los valores obtenidos en el ensayo se acercan a los de materiales de yeso aligerados con perlita (800 kg/m³); esta formulación es común en la industria de la construcción cuando se buscan conglomerantes de esas características y también se aplica en la fabricación de placas de yeso. En el proyecto de Norma UNE 102014-1:98 [1998], se contemplan valores de yeso aditivado con perlita que mejoran las condiciones de aislamiento térmico de los guarnecidos fabricados con este material [VILLAN01].
- Se ha evidenciado mediante el ensayo que las mezclas que incluyen espuma de EPS disminuyen notablemente sus densidades comparadas con las mezclas que no los contienen. Estas disminuciones de masa según la proporción de espumas en las probetas pueden ir desde un 43,1% al 56% (Tabla A3.14). Esto se puede explicar debido a que, a la pérdida de densidad que resulta de aumentar la relación de agua de amasado, se le ha de sumar la pérdida obtenida por la presencia de residuos de espuma, lo cual ofrece una probeta de muy alta porosidad.

A.3.1.7 ENSAYO DE FLEXIÓN

A.3.1.7.1 Descripción

Consiste en la determinación de la capacidad de carga máxima a la flexión y del módulo de rotura de los materiales en ensayo. Se busca establecer una relación de sus comportamientos durante esos tipos de tensiones, entre los materiales de yeso y escayolas sin mezclar con residuos de plástico y los materiales que sí se han mezclado con los residuos.

Este ensayo se realiza sobre probetas con forma de paralelepípedo, las que al momento del ensayo se apoyan en sus extremos. Las probetas se doblan bajo la carga flectora y finalmente rompen por los efectos combinados de compresión y tracción.

A.3.1.7.1.a Norma utilizada UNE 102031:

El ensayo se ha basado en la Norma Española UNE 102031: *Yesos y Escayolas de Construcción. Métodos de Ensayos Físicos y Mecánicos*. Esta norma se especifica en el *Pliego general de condiciones para la recepción de yesos y escayolas en obras de construcción*. En dicho pliego se definen los tipos usuales de yesos y escayolas en la construcción y sus características.

A.3.1.7.1.b Equipo

Para el ensayo se han utilizado diversas herramientas para la fabricación de la probetas además de los aparatos que se especifican en la norma antes mencionada:

Molde de acero con tres compartimientos

Vernier o Pie de rey marca Mitutoyo® con lecturas mínimas de 0,1 mm

Desecador

Balanza de precisión marca Sartorius® con una exactitud de $\pm 0,1$ g

Prensa de flexotracción marca ICON® con capacidad de carga superior a 10 kN

A.3.1.7.1.c Preparación de las probetas

Las probetas para este ensayo corresponden a las fórmulas de las mezclas seleccionadas en la primera etapa experimental, mismas que se describen en la tabla A3.15.

Para la fabricación de las probetas se usaron moldes de acero con tres compartimientos desarmables y con dimensiones interiores de 40 x 40 x 160 ($\pm 0,1$) mm que cumplen con lo señalado en la norma. En lo general las medidas de las probetas satisfacen lo requerido por la norma y se cumplieron las tolerancias marcadas. Sin embargo debido a las características de la mezcla de conglomerante y residuos de espuma de EPS en ocasiones algunas probetas sufrieron deformaciones en sus esquinas, caras o aristas; sí esto sucedió se asentó en las notas del ensayo y se consideró durante el análisis.

Para la fabricación de las probetas se procuró seguir el procedimiento del apartado 8.3 de la norma aplicada para el ensayo.

El manejo de las probetas previo al ensayo se hizo siempre en atmósfera de laboratorio y dentro de los rangos de temperatura y humedad que marca la norma, (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % HR. El ensayo de ha realizado en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la UPC.

Tabla A3.15 Características de las probetas ensayadas a flexión

Número de mezcla	Fórmula extendida (% en peso)	Fórmula condensada
R (42-44)	Yeso controlado 100% + Agua 120%	YC100+A 120
R (45)	Escayola 100% + Agua 120%	E100+A 120
R (49)	Yeso rápido 100% + Agua 80%	YR100+A 80
42	Yeso controlado 100% + Agua 120% + EPS Molido Grueso 2%	YC100+A 120+MG 2
44	Yeso controlado 100%+ Agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	YC100+A 120+MG 3
45	Escayola 100% + Agua 120% + EPS Molido Grueso 3%	E100+A 120+MG 3
49	Yeso rápido 100% + Agua 80% + EPS Molido Grueso 1,6%	YR100+A 80+MG 1,6

A.3.1.7.1.d Procedimiento

Posterior al moldeo y secado de las probetas y se han ejecutado los siguientes pasos:

1. Mantener en desecadora hasta masa constante (± 10 g); si la prueba no se realiza inmediatamente, mantener las probetas dentro de las condiciones que marca la norma.
2. Verificar en la balanza la masa constante de las probetas inmediatamente antes de la realización del ensayo.
3. Medir largos y anchos.

4. Aplicar la prueba.

Se ha calculado el módulo de rotura de cada probeta a través de la fórmula que señala la norma:

$$\sigma_b = 0.00250 \times P$$

Donde:

σ_b Es el módulo de carga expresado en N/mm²

P Es la carga de rotura en Newtons N

Nota:

La norma señala una constante 0,00234 la cual ha sido modificada para este ensayo debido a las características de la máquina de flexotracción disponible.

Los resultados individuales por probeta se han calculado y tabulado (tabla A.3.16).

Finalmente se ha obtenido el módulo de rotura promedio por tipo de mezcla (tabla A3.17).

A.3.1.7.2 Resultados del ensayo de flexión

Los resultados individuales por probetas se muestran en la tabla A3.16.

Tabla A3.16 Módulos de rotura de cada probeta ensayada a flexión

Probeta	Carga (N)	σ_b (N/mm ²)
R (42-44) -1	196,00	0,49
R (42-44) -2	98,00	0,25
R (42-44) -3	186,20	0,47
R (45) -1	656,60	1,64
R (45) -2	705,60	1,76
R (45) -3	862,40	2,16
R (49) -1	999,60	2,50
R (49) -2	1195,60	2,99
R (49) -3	1097,60	2,74
42-1	39,20	0,10
42-2	19,60	0,05
42-3	39,20	0,10
44-1	19,60	0,05
44-2	19,60	0,05
44-3	19,60	0,05
45-1	58,80	0,15
45-2	39,20	0,10
45-3	39,20	0,10
45-4	39,20	0,10
45-5	19,60	0,05
49-1	235,20	0,59
49-2	186,20	0,47
49-3	156,80	0,39
49-4	176,40	0,44

Tabla A3.17 Promedios de los módulos de rotura por mezcla

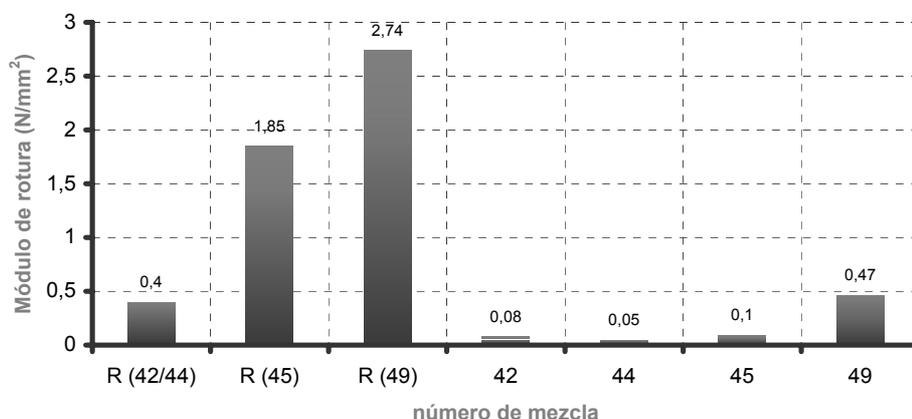
Número de mezcla	Fórmula	Módulo de rotura (N/mm ²)
R (42-44)	Yeso controlado100+A 120	0,40
R (45)	Escayola100+A 120	1,85
R (49)	Yeso rápido100+A 80	2,74
42	Yeso controlado100+A 120 + MG 2	0,08
44	Yeso controlado100+A 120 + MG 3	0,05
45	Escayola100+A 120 + MG 3	0,10
49	Yeso rápido100+A 80 + MG 1,6	0,47

A.3.1.7.3 Análisis de resultados del ensayo de flexión

Se han ensayado dos materiales: el primero de yeso o escayola con agua de amasado únicamente, y el segundo de yeso o escayola con agua de amasado más residuos.

Los valores más altos de la prueba los obtuvieron las mezclas que no contienen residuos de espuma de EPS, esto a excepción de la mezcla 49 que se sitúa en el tercer sitio en orden descendente (gráfica A3.2) y con un módulo de rotura equivalente al 17% de la mezcla YR100+A 80.

Ensayo de flexotracción. Según UNE 102 031



Gráfica A3.2 Módulos de resistencia promedio de las mezclas ensayadas

Probetas de yeso o escayola con agua de amasado únicamente

Se ensayaron dos conglomerantes de yeso y uno de escayola y dos proporciones de agua de amasado. El módulo de rotura más alto se obtuvo en la mezcla de yeso rápido R (49) con la presencia más baja de agua de amasado (80% en peso) con 2,74 N/mm².

El menor de los módulos obtenidos en las mezclas sin residuos de espuma R (42-44) fue la fabricada también con yeso pero con una relación de agua de amasado mayor (120%) con 0,4

N/mm². De esta manera se observa que con yesos con un 50% más de agua se ha reportado una pérdida de resistencia equivalente al 85%.

Entre probetas preparadas con conglomerantes diferentes pero con la misma relación de agua de amasado también se reportan notables diferencias. La probeta R (42-44) con un módulo 0,4 N/mm² es sólo el 21,6% de la resistencia de la mezcla R (45) con un módulo promedio de 1,85 N/mm².

La relación entre los valores promedio conseguidos en el ensayo con los valores mínimos de resistencia mecánica a flexotracción marcados en la Norma UNE 102 031 se muestra en la tabla A3.18. Ahí se observa que de las mezclas estudiadas sólo una de ellas tiene referencia a dicha norma. La mezcla de Yeso 0,8 ó Yeso100+A 80 (2,74 N/mm²) supera lo marcado por la norma (2-2,5 N/mm²); para las mezclas restantes no se encuentra referencia.

Tabla A3.18 Comparación entre valores conseguidos en el ensayo y los marcados por la Norma UNE 102 031

Fórmula (Y-E/Agua)	Valor mínimo según norma (N/mm ²)	Valores conseguidos (N/mm ²)
Yeso 0,8	2 – 2,5	2,74
Yeso 1,2	-	0,4
Escayola 0,8	3 – 3,5	-
Escayola 1,2	-	1,85

Probetas de yeso y escayola con residuos de espuma de EPS

De entre las mezclas sin agregados de espuma, la mezcla 49 es la de módulo más alto con 0,47 N/mm². Esta última mezcla es la que guarda la menor relación de agua de amasado (80%) con relación a las demás probetas (agua:120%) del grupo.

Las mezclas 42, 44 y 45 tienen un módulo de rotura promedio mucho más bajo que aquellos de la mezcla 49. Esto se puede explicar debido a una mucha más alta proporción de agua de amasado (120% contra 80% en peso) en las tres primeras, lo que significa mayor porosidad del conglomerante usado y de aquí, una menor resistencia a la flexión.

Las formulas de las mezclas 44 y 45 son semejantes en proporción de agua de amasado (120%) y en el porcentaje de espuma usado (3% en peso) aunque diferentes en el conglomerante donde la escayola ofrece mejores resultados (0,10 N/mm²) contra (0,05 N/mm²) el yeso controlado, lo que se puede explicar por las mejores características mecánicas de la escayola sobre el yeso y que pueden ser hasta de un 30% más entre los módulos de rotura correspondientes según la Norma UNE 102 031.

Por otra parte las mezclas 42 y 44 son semejantes en el conglomerante y en la proporción de agua (120%) de amasados usados. Son diferentes en el porcentaje de espuma que participa de las mezclas (2% y 3% respectivamente) y es la mezcla 42 la que más alto módulo promedio ofrece (0,08 contra 0,05) y que puede explicarse por una mayor cantidad de conglomerante en la mezcla 42, espacio que en la mezcla 44 ocupa el plástico celular equivalente.

A.3.1.7.4 Conclusiones del ensayo de flexión

Se han ensayado a la flexión dos grupos de materiales similares, uno de conglomerantes amasados con agua únicamente, y otro grupo fabricado con los mismos conglomerantes y

relaciones de agua de amasado pero con agregados de residuos de espuma de EPS. El fin fue el de establecer una comparación simple de resistencia a la flexión entre los dos grupos de probetas.

- La información obtenida del ensayo para mezclas comunes (proporción de agua de amasado 80%) corresponde con los rangos que señala la investigación preliminar y satisface los valores mínimos que demanda la norma correspondiente, por lo cual consideramos que es información válida y útil.
- El ensayo de probetas de mezclas con relaciones altas de agua de amasado (120%) muestra que hay una pérdida muy importante de resistencia a la flexotracción en ellas, que puede oscilar entre el 38,4% y el 80% con relación a los valores más bajos obtenidos en la información preliminar para mezclas con menos agua de amasado (80%). Un factor importante en la explicación de ese comportamiento, es la presencia de agua libre en los poros que actúa como lubricante entre los cristales del cuerpo fraguado y a la porosidad que adquiere la mezcla por la mayor proporción de agua de amasado.
- De la misma manera, el ensayo ha confirmado que las mezclas que contienen residuos de espuma de EPS en su fórmula, resultan con pérdidas de resistencia mucho mayores que las mezclas que no los contienen. Se establecen comparaciones que indican que las mezclas con residuos de espuma tienen un módulo de flexión que oscila entre el 5,4% y el 20% en relación a sus mezclas de referencia (sin residuos de espuma).
- A las razones expuestas en el párrafo anterior podemos agregar que la inclusión de residuos de EPS en las mezclas provoca un aumento aún mayor de la porosidad del cuerpo fraguado lo que conlleva una pérdida de resistencia a los esfuerzos que aquí se ensayan.

A3.2 CONCLUSIONES GENERALES DEL ANEXO A 3

La aplicación de residuos acondicionados de espuma de EPS como aligerantes de pastas de yeso o escayola en la construcción, plantea posibilidades para el aprovechamiento de ese plástico en:

*Cargas para **pastas** de albañilería de yeso o escayola con residuos de EPS*

A los revestimientos de yeso extendidos manualmente sobre muros y techos se les conoce como *tendidos* que están formados por varias capas de pasta de yeso la primera de ellas el *guarnecido* de entre 1 y 2 cm de espesor soporta a otra capa fina, de terminación o *enlucido* que es la que da vista al recubrimiento. Estos acabados son *recubrimientos de interiores* [VILLAN01].

La adición de residuos molidos de EPS en la pasta para la fabricación de guarnecidos aumenta el volumen de la masa de yeso disminuyendo su coste, permite disminuir su peso y coopera a mejorar las propiedades térmicas del revestimiento, sin embargo para la aplicación de este material *es imprescindible el uso de un enlucido fino*, debido a la aparición del residuo de EPS en las capas visibles del guarnecido.

*Cargas de **pastas** escayola con residuos de EPS para la fabricación de complementos decorativos.*

Los complementos son productos decorativos moldeados con escayola que generalmente se instalan en techos para ocultar elementos colgantes u otras instalaciones. Algunas de estas

formas moldeadas son; molduras, que son piezas largas con diversas secciones que se colocan en las esquinas que forman el techo y la pared. Los cortineros son piezas largas y planas que buscan ocultar las partes colgantes de los cortineros o los plafones que se ubican en el centro de los techos de las habitaciones para disimular el paso de instalaciones eléctricas.

Para su evaluación se compararon los comportamientos de los conglomerantes formulados únicamente con agua para su amasado y los comportamientos de materiales formados por los conglomerantes adicionados de residuos de espuma. Tabla A.3.19.

Tabla A3.19 Resultados generales de los ensayos para el uso de pastas aligeradas de yeso o escayola para la construcción

Número de mezcla	Compresión (N/mm ²)	Densidad aparente (kg/m ³)	Resistencia a la flexión (N/mm ²)
42 (YC100+A 120+MG 2)	0,5	505,22	0,08
44 (YC100+A 120+MG 3)	0,5	414,9	0,05
45 (E100+A 120+MG 3)	0,7	413,04	0,10
49 (YR100+A 80+MG 1,6)	1,4	547,05	0,47
R(42-44) (YC100+A 120)	1,6	887,36	0,40
R(45) (E100+A 120)	4,3	948,51	1,85
R(49) (YR100+A 80)	6,8	1.165,94	2,79

Del *ensayo de compresión* (A3.1.5) podemos obtener las siguientes conclusiones:

- El ensayo confirma los valores de resistencia a la compresión de yeso y escayola que se han obtenido durante la investigación preliminar, sin agregados y con las proporciones de agua de amasado usuales.
- El ensayo confirma la relación que se da entre la pérdida de resistencia a la compresión, el aumento de la proporción de agua en el conglomerante y la de la mayor presencia de residuos de espuma en las probetas ensayadas.
- De los datos se obtiene que los valores más altos del ensayo se dan en mezclas sin espuma y con las menores cantidades de agua en su fórmula. Los valores más bajos son comparativamente notorios y se dan en las mezclas ricas en agua de amasado y con alta presencia de residuos de espuma.

Las conclusiones con respecto al *ensayo de densidad aparente* (A.3.1.6) son las siguientes:

- Del ensayo se puede confirmar que es viable disminuir las densidades de las mezclas de yeso o escayola aumentando la cantidad de agua presente en la fórmula.

- Los resultados de la prueba señalan que es posible la disminución de altos porcentajes de densidades aparentes en las mezclas de interés, por medio de la integración de residuos de espuma.
- De los datos del ensayo se puede apuntar que mediante la integración de residuos de espuma es posible disminuir inclusive las densidades declaradas de materiales de yeso y escayola aligeradas con materiales comunes como la perlita.

Con respecto al *ensayo de flexión* (A3.1.7) de mezclas de yeso y escayola con agregados de residuos de espuma de EPS se obtienen las siguientes conclusiones:

- La prueba ha confirmado la relación que hay entre la pérdida de resistencia a la flexión y la porosidad de las mezclas ensayadas y que se debe a dos factores; una alta proporción de agua de amasado y a la presencia de residuos de EPS como aligerantes de la mezcla.
- El ensayo ha hecho evidente que un aumento de la relación del agua de amasado en la fórmula del conglomerante, provoca una importantes caídas en los valores de resistencia a la flexión de los materiales ensayados, y que pueden ir desde una mitad hasta la quinta parte comparados contra los valores de mezclas con proporciones de agua convencionales.
- Según lo obtenido las mezclas propuestas ofrecen valores muy bajos de resistencia a la flexión al enfrentarlos con los datos de las mezclas de fórmulas similares pero que no contienen residuos.

Del *conjunto de ensayos* practicados a las propuestas de aplicación de residuos de espuma como aligerantes de **pastas** de yeso o escayola para la construcción, podemos señalar que si bien se obtienen mezclas de baja densidad y que puede también ser de interés para la disminución de los costos de construcción; estas ventajas se ven disminuidas por la pérdida de propiedades mecánicas que se han estudiado en las otras pruebas.

Las conductas en los ensayos señalan que las aplicaciones adecuadas para las **pastas** para la construcción pueden ser aplicadas como guarnecidos o revestimientos gruesos que requerirán enlucidos finos posteriormente, aunque para ello habría que considerar la tendencia de los materiales a absorber humedad y agua lo que deteriora sus propiedades, por lo cual su aplicación se ve limitada a zonas de interiores o alejadas de la lluvia.

Con atención a los resultados de los ensayos consideramos que de entre los materiales que se han estudiado, las fórmulas similares a la que se expone en la tabla A3.20 pueden ser aplicadas con éxito en obras de construcción, bajo las condiciones que se han mencionado en párrafos anteriores.

Tabla A3.20 Mezcla con las mejores características para la aplicación como pastas aligeradas de yeso o escayola para la construcción

No de mezcla	Fórmula	Compresión N/mm ²	Densidad aparente kg/m ³	Resistencia a la flexión N/mm ²
49	YR100+A 80+MG 1,6	1,4	547,05	0,47

En el ensayo de Compresión:

UNE 102031:1999. *Yesos y Escayolas de Construcción. Métodos de Ensayo Físicos y Mecánicos.*

Normativa sobre yesos y escayolas. Pliego general de condiciones para la recepción en obras de construcción (RY-85). B.O. Estado 10 de junio de 1985 (num. 138).

En el ensayo de Densidad Aparente:

UNE 102035 – *Placas de yeso laminado. Métodos de ensayo.* Determinación de la densidad aparente.

En el ensayo de Flexión:

UNE 102031:1999. *Yesos y Escayolas de Construcción. Métodos de Ensayo Físicos y Mecánicos.*

Normativa sobre yesos y escayolas. Pliego general de condiciones para la recepción en obras de construcción (RY-85). B.O.E. 10 de junio de 1985 (num. 138).

