

5.1.2.- Comportamiento a compresión.

Para la realización de los ensayos de compresión se eligieron condiciones de deformación plana probándose dos tipos diferentes de mordazas y probetas. Por un lado la probeta de flexión ($B= 6.35 \text{ mm}$) se probó con la mordaza de 20 mm. de anchura mientras que por otro lado se sometió a compresión la parte central de una probeta halterio ($B=3.17 \text{ mm.}$) con una mordaza de amplitud 6.4 mm.

Las relaciones de Williams (ecuación 4.5) aplicadas a las configuraciones anteriores arrojan los valores: $w^*/B= 3.15$ en el primer caso y: $w^*/B=2,01$ en el segundo, por lo que en ambas situaciones nos encontramos en condiciones de deformación plana variando de una a otra la velocidad de deformación del material.

Adicionalmente y a efectos de comprobar la influencia de las condiciones del ensayo se realizaron unos análisis finales en las que las condiciones elegidas eran de tensión plana. En esta situación se tomó $B=6.35$ y $w^*=6.4$.

La caracterización de la tensión de compresión de las muestras se ha realizado con la consideración de la tensión de fluencia como parámetro definitorio de los ensayos. Las curvas experimentales se representan en la figura 5.23.

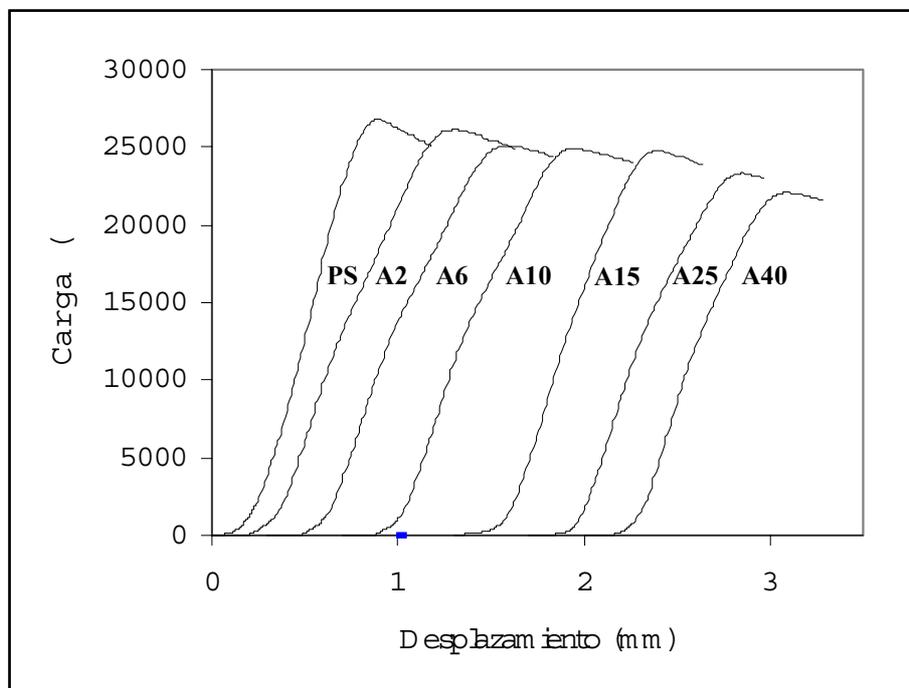


Figura 5.23- Curvas carga-desplazamiento en compresión. $v=1 \text{ mm/min.}$ $w^*=20\text{mm}$
 Nota: Las curvas se han desplazado del origen para su mejor compresión.

Las curvas carga-desplazamiento registradas se caracterizan en todos los casos por un rasgo común: una región lineal a bajas tensiones seguida de una corta zona de fluencia a máxima tensión para finalizar con un decremento final de la carga.

Es bien conocido que la tensión de fluencia de los materiales poliméricos es mayor en compresión que en tracción ello es consecuencia de los diferentes estados de deformación (deformación plana / tensión plana) existentes en cada uno de los casos.

En un ensayo de tracción la deformación que se impone puede compensarse por la aparición de cedencia, cavitación o crazing. En compresión el mecanismo de deformación es únicamente la cedencia por cizalladura pues la configuración del ensayo impide la dilatación del material. Sobre la sección comprimida de la probeta hemos observado la aparición de finas bandas de cizalladura que contienen material altamente deformado. Las bandas que se cruzan a 45 grados formando un entramado aparecen como consecuencia del mecanismo de ablandamiento por deformación.

Cuando una determinada región comienza a ceder por cizalla resulta más favorable que continúe haciéndolo en lugar que el fenómeno se origine en un área adyacente y relativamente poco deformada. Esto se produciría porque la tensión necesaria para alcanzar la fluencia en una zona previamente deformada es menor que la de las regiones cercanas que todavía no han comenzado a deformarse.

Tabla 5.7.- Tensiones y deformaciones en el punto de fluencia obtenidas por compresión.

Muestra	$w^*/B=3.15$ $\dot{\varepsilon} = 0,15$		$w^*/B=2$ $\dot{\varepsilon} = 0,31$		$w^*/B=1$ $\dot{\varepsilon} = 0,15$	
	σ_{cp} (MPa)	ε_{cp} (%)	σ_{cp} (MPa)	ε_{cp} (%)	σ_{cp} (MPa)	ε_{cp} (%)
PS	106,22	9,344	105,45	13,86	95,46	10,97
A2	100,94	15,63	101,32	20,44	97,88	12,65
A6	99,64	15,02	104,74	19,51	92,53	12,52
A10	99,05	14,74	101,61	19,5	91,42	14,81
A15	97,20	13,32	94,00	17,97	88,56	14,75
A25	94,50	13,59	91,02	18,18	86,68	13,45
A40	86,29	12,15	87,87	16,42	81,89	11,62

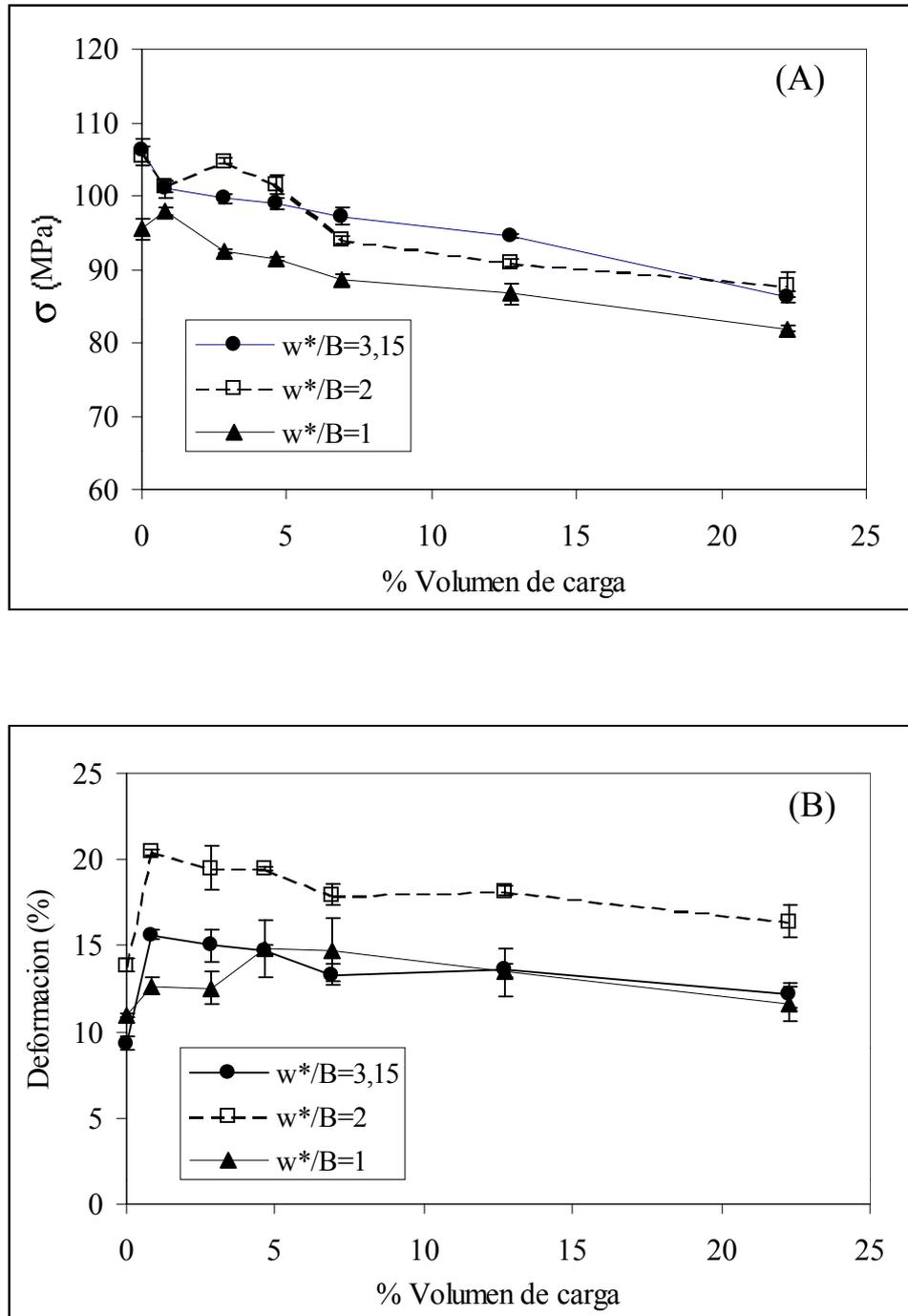


Figura 5.24.- (A) Evolución de la tensión de cedencia a compresión de los compuestos para diferentes configuraciones de ensayo.
 (B) Evolución de la deformación a compresión de las probetas.

El nivel de las tensiones de cedencia obtenidas por compresión mostradas en la figura 5.24 indica que las condiciones de deformación plana dan valores mayores de resistencia en los dos primeros casos, apreciándose una disminución conforme nos alejamos de esta situación.

La tensión a fluencia en compresión experimental del Poliestireno es de orden similar a la referenciada por Bucknall [1988], 114 MPa., o por Young y Lowell [1994] que dan como referencia 95 MPa. En la tabla 5.8 se muestra el resumen de valores encontrados.

La evolución respecto del contenido de segunda fase muestra una ligera pero sostenida disminución de la tensión de cedencia desde el máximo localizado para la matriz pura. En términos comparativos la tendencia observada pudiera ser considerada similar a la acontecida en tracción, sin embargo los mecanismos de deformación son diferentes en cada caso y en contraste con el ensayo de tracción las partículas en compresión son capaces de intercambiar esfuerzos con la matriz. En esta situación la máxima tensión de compresión, (y por consiguiente la máxima tensión de cizalla que es la que gobierna la fluencia) se produce en la fase continua de matriz. En compresión las deformaciones que se pueden alcanzar son muy bajas de modo que la resistencia cohesiva del componente más débil gobernará la resistencia a compresión del compuesto. La presencia de partículas tiene un efecto de minoración de la energía de activación del proceso de fluencia.

En lo referente a la deformación, la de muestra 2 (— —) es superior a cualquiera de las otras dos series, las condiciones de deformación plana y la mayor velocidad aplicada propician tal respuesta.

La gráfica 5.24 (B) indica un comportamiento similar al ocurrido en tracción con un salto grande de la deformación al añadir una muy pequeña cantidad de esferas, independientemente del estado, tensión plana ó deformación plana.

En el poliestireno las bandas de cizalladura se forman con preferencia en la superficie o en las imperfecciones intrínsecas del material, su número es reducido y la cantidad de material deformado baja.

En los compuestos, las partículas son puntos heterogéneos que promueven y facilitan la generación de las bandas, aumentando su número y el material que de forma efectiva se ha deformado.

5.1.3.- Comportamiento a flexión.

Los ensayos mecánicos de flexión se han llevado a cabo según la geometría de tres puntos determinándose los valores de la tensión máxima en la cara de tracción (σ_f) y del módulo aparente en flexión (E_f). El valor de E_f se ha calculado teniendo en cuenta los efectos de indentación en los apoyos. La tabla siguiente refleja los valores obtenidos en los ensayos experimentales de flexión:

Tabla 5.8.- Determinaciones del ensayo de flexión por tres puntos.

E_f : Módulo elástico aparente en flexión.

σ_f : Tensión máxima en la cara de tracción.

MUESTRA	V= 1 mm/min	
	E_f (MPa)	σ_f (MPa)
PS	2647 ± 193	54,34 ± 5.7
A2	2663 ± 79	56,88 ± 2.5
A6	2577 ± 134	57,18 ± 2.8
A10	2579 ± 121	56,26 ± 2.6
A15	2610 ± 50	55,63 ± 2.6
A25	2701 ± 132	51,01 ± 2.2
A40	3243 ± 150	43,70 ± 1.1

En lo referente al módulo de elasticidad los resultados obtenidos son similares en magnitud a los hallados por tracción si bien están ligeramente por debajo de ellos. Puede observarse que algunos de los valores reseñados en la tabla anterior tienen una incertidumbre amplia, este es consecuencia de la fragilidad de los compuestos que dan lugar a una rotura súbita y por lo tanto a mayor variabilidad intrínseca. Se observa que la rigidez aumenta con la cantidad de microesferas

El módulo en flexión es poco sensible a la variación en contenido de microesferas. Una de las causas es la poca efectividad reforzante de las microesferas en las condiciones de este ensayo para el que resultan mucho más adecuadas cargas de tipo filiforme con una relación de aspecto (longitud /ancho) elevada.

La variación del módulo aparente en flexión frente a la composición para las velocidades de ensayo empleadas se ve en el gráfico siguiente.

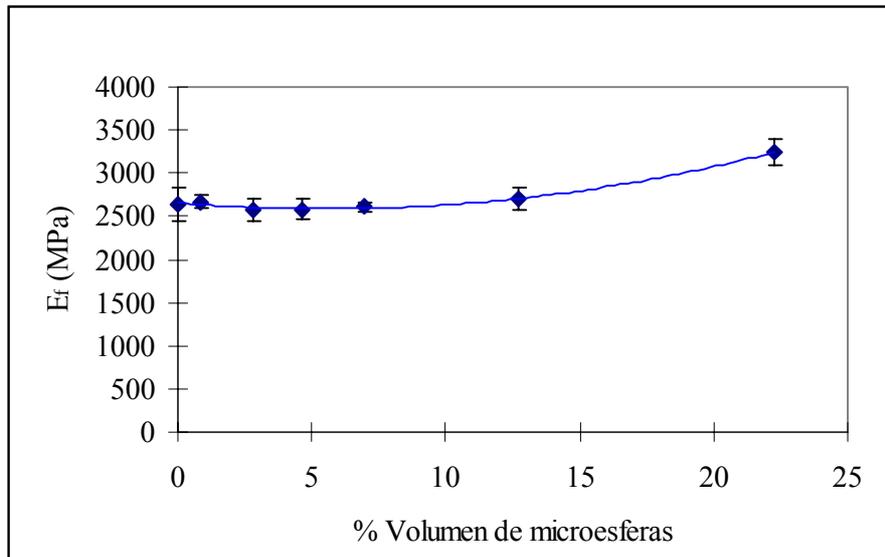


Figura 5.25.- Modulo de elasticidad aparente en flexión frente a la fracción en volumen de partículas.

La tensión máxima en la cara de tracción resulta ser entre 1.8 y 2 veces mayores que la correspondiente tensión en tracción. Este efecto ha sido observado en sistemas polipropileno/talco [Velasco 1996] y policarbonato/ABS [Santana 1997] atribuyéndose a la diferente configuración del ensayo y estado tensional de las probetas de tracción y flexión.

Al añadir microesferas al poliestireno disminuye la tensión de fluencia del compuesto (figura 5.26) debido al efecto concentrador de tensión causado por las partículas. Los resultados indican que se está produciendo un fenómeno de este tipo pues se registra un descenso significativo cuando el porcentaje de carga es importante.

La observación de la evolución del daño sobre la superficie transversal al ensayo en una probeta cargada cualquiera refleja el crecimiento de una zona de emblanquecimiento desde la parte inferior de la probeta (tracción) hacia la zona central de la misma. Este área, con deformación plástica localizada, es notablemente mayor en magnitud en las muestras con más carga alcanzando en la sección transversal aproximadamente la mitad de la probeta. La rotura en realidad se produce cuando la zona deformada alcanza la parte central de la probeta momento en que en la fibra más exterior se ha superado el nivel de tensión admisible. Simultáneamente en la zona superior también se localiza una zona, mucho menor que sufre emblanquecimiento. En este caso debe atribuirse al efecto de indentación localizada del rodillo de transmisión del esfuerzo.

Las evoluciones de los valores de la resistencia a flexión son concordantes con los evidenciados por los ensayos a tracción. La tendencia se aprecia en la figura 5.26.

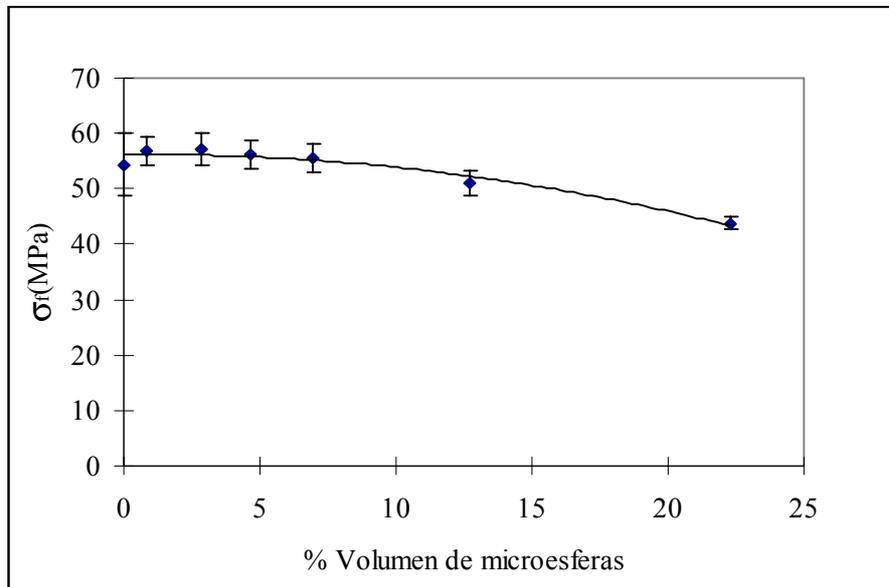


Figura 5.26.- Evolución de la resistencia a la flexión frente al contenido de carga $\dot{\epsilon}^*=0.015 \text{ min}^{-1}$

La forma de las curvas fuerza-desplazamiento es aproximadamente lineal pero se aprecia la aparición de un punto de fluencia a alto nivel de esfuerzo que se asocia a la extensión del crazing sobre la probeta y que resulta más evidente a partir de las composiciones intermedias (A15-A40). Comparativamente con el ensayo de tracción, la inflexión en la curva F-d está menos localizada pues debe tenerse en cuenta que sólo existe media probeta sometida a esfuerzos de tracción mientras que la otra mitad se encuentra en compresión dónde la separación carga-matriz no está favorecida. Así, sólo en los compuestos con más carga (A25-A40) se aprecia con claridad una desviación de la pendiente inicial de la curva.

Un aspecto significativo a reseñar en la gráfica 5.27 es el aumento en la capacidad de deformación de los compuestos intermedios sin que por ello exista una pérdida importante de resistencia mecánica. Los compuestos con mayor carga, por el contrario, poseen una menor capacidad para soportar esfuerzos y el nivel de deformación admisible por la probeta caen al nivel del poliestireno sin modificar.

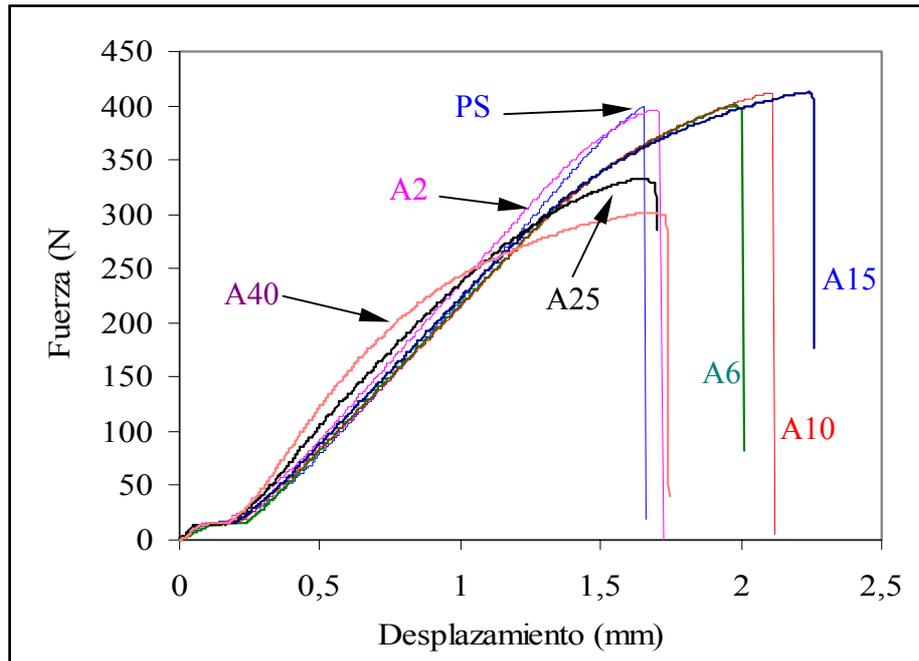


Figura 5.27.- Curvas Fuerza-desplazamiento para los diferentes compuestos.
($V=1$ mm/min)

5.1.4.- Resumen.

Las soluciones analíticas para el módulo de los compuestos resultan útiles en la predicción de los límites de variación del módulo de Young. De las diferentes condiciones los modelos que suponen un estado de isotensión se han aproximado más al comportamiento de los compuestos poliestireno-microesferas. El módulo de Young de las mezclas PS-microesferas puede modelizarse a bajo contenido de carga a través de la regla de las mezclas mientras que a mayor porcentaje resultan adecuados el modelo de Greszczuk y el de Sato y Furukawa para el caso de no-adhesión. El módulo de Young aumenta significativamente al incrementar la fracción en volumen de partículas y las variaciones de E_c con la velocidad de deformación se deben a la viscoelasticidad de la matriz. El mecanismo de mejora de las propiedades elásticas está presente en todas las velocidades analizadas.

La evolución de la resistencia a la tracción con la cantidad de carga puede predecirse con el modelo de Nicolais y Narkis. Con respecto a la velocidad de deformación, su variación produce un aumento paralelo en las tensiones de fluencia de los compuestos que es independiente del contenido de carga. Esta independencia indica que el mecanismo de deformación es el mismo en todos los casos.

La introducción de microesferas de vidrio no adheridas a la matriz de poliestireno origina la aparición de tensiones residuales internas de carácter compresivo. En las gráficas tensión-deformación de los compuestos poliestireno-microesferas existe un

punto de inflexión que se asocia al momento en que la tensión aplicada iguala a la interna y se produce la separación entre carga y matriz. El nivel de tensión necesaria para conseguir dicha separación se estima en 10 MPa y es independiente del contenido de carga. A partir de la posición del punto de inflexión se ha derivado una predicción del módulo elástico que ha proporcionado buenos resultados.

La deformación a cedencia y rotura de las mezclas con partículas ha sido muy superior a la de la matriz pura. El aumento de la deformación está causado por un mecanismo de deformación consistente en la generación de múltiples crazes en la matriz. Este hecho implica que las partículas incrementan el potencial de fisurado al constituirse como núcleos del origen de crazing. La generalización de un mecanismo dilatante como el crazing en el volumen de la probeta explica el incremento de deformación. Se ha observado también que la deformación a rotura de las muestras es muy superior a la deformación a fluencia. Cuando se produce la fluencia el crazing es extensivo en toda la probeta por lo que la diferencia es consecuencia de un freno impuesto por las partículas a la propagación de grietas, así pues las partículas actúan como puntos de terminación de las crazes, evitando la aparición de crazes catastróficas de gran tamaño.

La máxima deformación se alcanza con un 15% en peso de carga mientras que mayores cantidades de carga se revelan inactivas. Cuando el porcentaje de microesferas es muy elevado la deformación disminuye bien como resultado de una saturación de la matriz o bien como consecuencia de la coalescencia de crazes próximas.

La energía absorbida por los compuestos hasta su fractura alcanza un máximo en las composiciones intermedias (A10-A15), que registran tensiones intermedias y deformaciones máximas. El aumento de la absorción energética es también atribuible a la potenciación del mecanismo de deformación por crazing múltiple. Esta tendencia se mantiene al variar la velocidad de deformación del ensayo.

En compresión el comportamiento de los compuestos ha sido lineal hasta alcanzar la tensión de fluencia a partir de la cual el material ha sufrido un ablandamiento por deformación. En todos los casos el mecanismo de deformación ha sido la cedencia por cizalladura localizada en forma de finas bandas de material altamente deformado. La tensión de fluencia a compresión disminuye con el porcentaje de carga, probablemente como resultado de un efecto coadyuvante de las partículas a la generación de las bandas de cizalla.

El módulo aparente en flexión de los compuestos ha sido similar al de tracción si bien el efecto de refuerzo parece ser menos efectivo debido a que en flexión parte de la probeta trabaja a tracción y parte a compresión. Las tensiones por flexión en la cara de tracción son superiores a las registradas en tracción pura debido principalmente al cambio de condiciones de deformación de los ensayos.

5.2.- Características mecánicas a alta velocidad de deformación. Ensayos de caída de dardo instrumentados.

Los ensayos de caída de dardo instrumentados constituyen un método con el que es posible caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales poliméricos en condiciones de alta velocidad de deformación.

En el impacto con exceso de energía en el impactor, el dardo atraviesa completamente la muestra y el fenómeno se desarrolla cuasiestáticamente, de manera que se simplifica el análisis de la respuesta de los materiales.

Entre otras técnicas existentes, la denominada técnica de baja energía se ha aplicado satisfactoriamente al análisis de la generación y propagación de grietas y al estudio de las propiedades elásticas del material. La técnica de baja energía engloba dos modelos teóricos de impacto: flexión e indentación.

En este apartado se reflejan los resultados de la aplicación de los diversos modelos en el estudio del comportamiento mecánico y de la rotura del poliestireno y de los compuestos poliestireno-microesferas de vidrio. Los resultados obtenidos muestran que es posible determinar tanto el módulo elástico como los procesos de emblanquecimiento, crazing y rotura de los materiales.

5.2.1.- Modelo de flexión con exceso de energía en el impactor.

La normativa ISO/DIS 6603-2 recomienda para el ensayo de impacto de materiales de comportamiento frágil una velocidad entorno a 1m/s, y establece una pérdida de velocidad que debe ser menor del 20 % durante el proceso. A partir de esta referencia elegimos una altura de caída de 0,035m. ($v= 0,82$ m/s) colocando en el impactor la mayor masa permitida por la configuración (3.730 Kg.). En estas condiciones la pérdida de velocidad durante el impacto nunca fue superior al 10% y se produjo la fractura completa de las muestras obteniendo curvas fuerza-tiempo con efectos dinámicos aceptables. En la figura 5.28 se muestra un ejemplo de las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas. Todas las muestras evidenciaron una curva respuesta similar y acorde con la producida por un material de comportamiento frágil.

Durante las primeras etapas del contacto y antes de alcanzar el máximo de fuerza, en la curva registro aparecen picos secundarios superpuestos a la propia curva (A). Estas oscilaciones son consecuencia de la naturaleza dinámica del ensayo en la que la vibración de la probeta ocasiona múltiples contactos con el impactor,

como los captadores de fuerza están situados en la cabeza del impactor se genera y registra una curva oscilante.

Las curvas tienen una trayectoria ascendente hasta alcanzar el máximo de fuerza que se asocia con la necesaria para causar el inicio de la grieta, a continuación el valor de la fuerza cae a un nivel inferior como resultado de la pérdida de rigidez de la probeta (B).

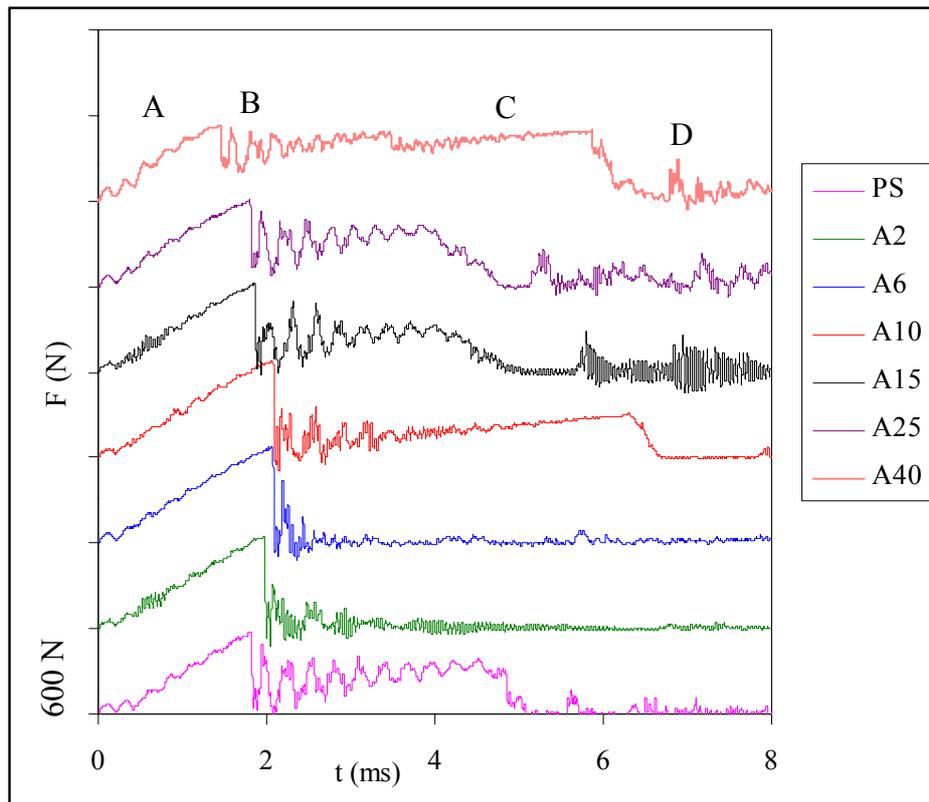


Figura 5.28.- Registros Fuerza-tiempo genéricos por caída de dardo para las diferentes mezclas. $v=0.82$ m/s, $m=3,730$ Kg. Las curvas están desplazadas 600 N. en el eje Y.

El área comprendida entre el instante inicial y el momento en que se alcanza el valor de máxima fuerza se corresponde con la energía absorbida por el material hasta su fractura. Se aprecian oscilaciones dinámicas superpuestas a las curvas que son resultado de la fricción entre dardo y probeta mientras ésta se ve atravesada y también por el golpeo de la cabeza del impactor con los trozos desprendidos de la probeta. Una vez sobrepasado el punto de máximo esfuerzo en algunos casos se produce un nuevo crecimiento del valor de la fuerza que es principalmente debido a la creación del orificio de paso del impactor (C). Al llegar a esta zona el impactor atraviesa la probeta que se rompe por completo separándose en diversos trozos.

Al final del ensayo se producen una serie de oscilaciones que son consecuencia del contacto de la masa descendente con los sistemas de paro y detención del propio aparato (D).

El módulo elástico de los materiales se obtuvo ampliando la zona inicial de la curva fuerza-desplazamiento y extrayendo su pendiente mediante el mejor ajuste a los datos experimentales, aunque sin perder de vista para su trazado la tendencia general de la curva de datos (figura 5.29-A), pues en otro caso la simple consideración de la zona inicial de la curva llevaría a una indeterminación en los resultados como se puede ver en la figura 5.29 B. Una vez conocida la pendiente, el valor numérico del módulo se extrajo, asumiendo comportamiento elástico y lineal, por aplicación de la ecuación 4.18.

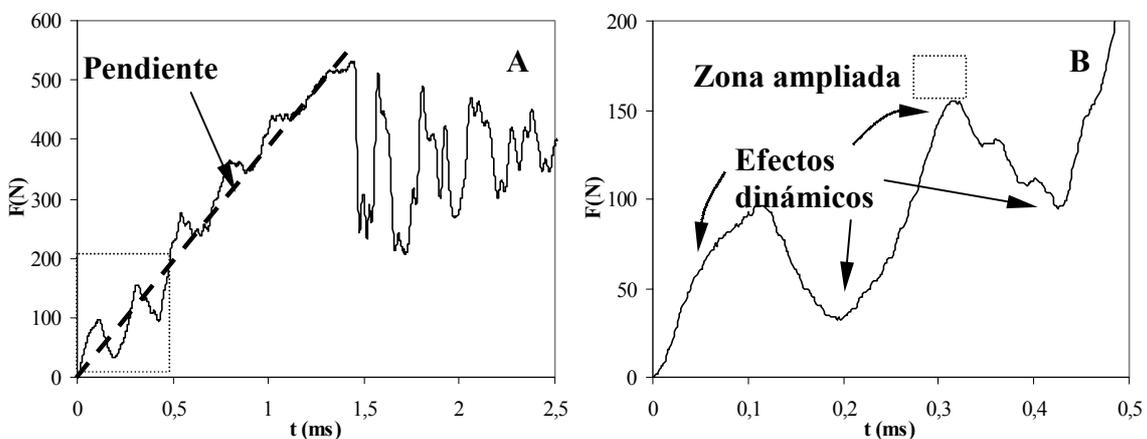


Figura 5.29.- A.- Determinación de la pendiente en presencia de efectos dinámicos.
B.- Ampliación de la zona inicial de la curva, efectos dinámicos sobre la curva.

El módulo de elasticidad mantiene un valor prácticamente constante hasta la mezcla A15, mientras que las dos mezclas con más carga exhiben un valor del módulo superior al resto. También se observa aumento del nivel de los efectos dinámicos como resultado de la mayor rigidez del contacto.

Las evoluciones del módulo y la resistencia máxima en la cara de tracción de las probetas sometidas a impacto se pueden observar en las figuras 5.30 A y B

Con respecto a la tensión máxima registrada, su tendencia es semejante a la determinada en el ensayo de flexión por tres puntos. La magnitud de la tensión es superior en el ensayo de impacto como resultado de la mayor velocidad de deformación aplicada sobre la probeta, sin embargo las diferencias son poco acusadas debido al bajo carácter viscoelástico del poliestireno.

Al igual que en los ensayos a baja velocidad se observa la caída de la tensión máxima del material a medida que aumenta el número de microesferas como resultado del efecto concentrador de tensión de las partículas. A altos niveles de carga el decremento de la tensión del compuesto puede acentuarse por coalescencia de vacíos que se forman en el entorno de las partículas.

El origen del fallo de los compuestos se produce en todos los casos en la cara de la probeta sometida a esfuerzo de tracción.

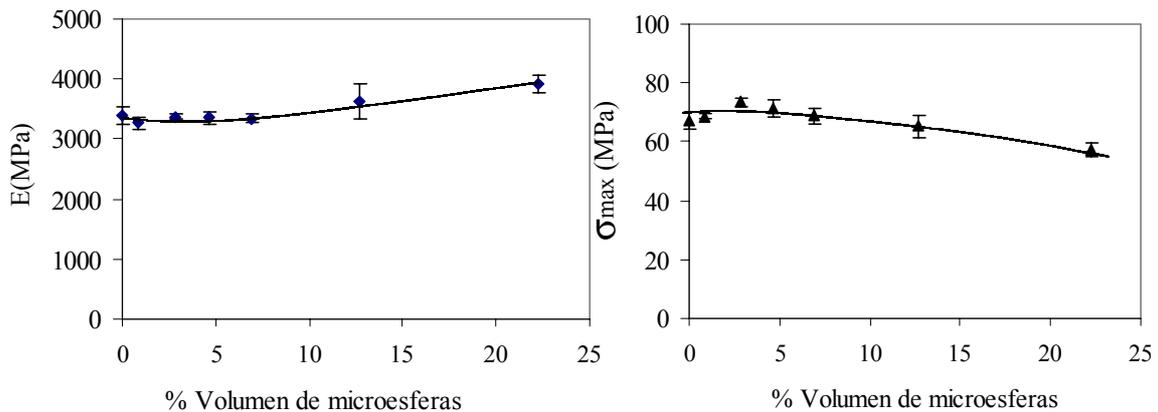


Figura 5.30.- A.- Evolución del módulo elástico a impacto con el contenido de microesferas.

B.- Tensión máxima a impacto determinada sobre probetas circulares y en su cara inferior.

La energía absorbida por la muestra durante el evento ha sido medida indirectamente a través de la energía cinética perdida por el impactor. A los valores obtenidos se les aplicó una corrección consistente en sustraer de la energía total absorbida la parte correspondiente a la indentación entre probeta y cabeza impactora. El ensayo de indentación se condujo hasta registrar los mismos valores de fuerza máxima. En todos los casos las pérdidas por rozamientos fueron despreciables.

En la figura 5.31 puede observarse como el nivel energético alcanza un máximo en las proporciones intermedias de carga que serían las más eficientes en cuanto a potenciación de los mecanismos disipadores de energía. Los mecanismos de refuerzo introducidos por la carga, cavitación de las partículas y crazing, están presentes aun cuando las velocidades de los sucesos son elevadas. Altas proporciones de carga llevan a un decremento de la energía absorbida por la muestra

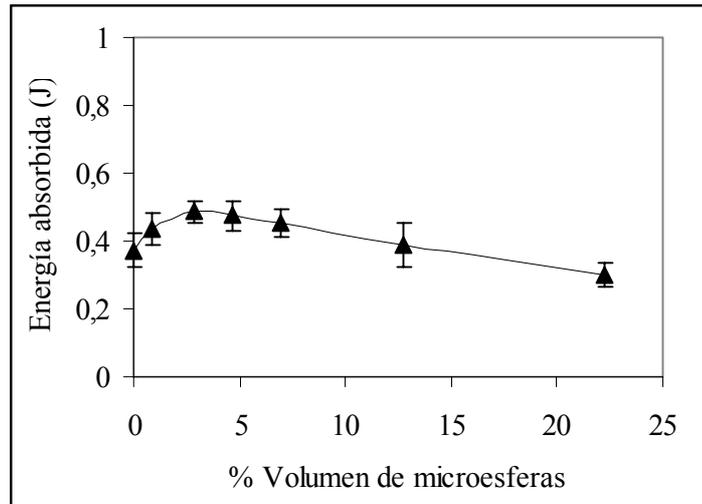


Figura 5.31.- Energía absorbida por las muestras en el ensayo de impacto.

En la tabla 5.9 se muestra el resumen de los valores obtenidos durante el ensayo de impacto. Como aspecto gráfico del cambio de rotura experimentado por las muestras al añadir microesferas, debe señalarse que en las muestras PS y A2 se observó desprendimiento de fragmentos de las probetas fuera del área de ensayo, mientras que para el resto de composiciones los fragmentos rotos que se separan de la probeta quedaron en la vecindad de la zona de trabajo sin acelerarse como en el primer caso indicando una mayor estabilidad de la fractura.

Tabla 5.9.- Resumen de resultados obtenidos por el método de impacto de alta energía.

MUESTRA	V= 0,82 m/s		
	E_{I-e} (MPa)	σ_{I-e} (MPa)	U_{I-e} (J)
PS	3388 ± 139	67.31 ± 3.12	0.37 ± 0.05
A2	3262 ± 104	68.48 ± 0.85	0.43 ± 0.05
A6	3372 ± 35	73.04 ± 1.70	0.47 ± 0.03
A10	3356 ± 98	71.35 ± 2.84	0.47 ± 0.04
A15	3342 ± 70	68.71 ± 2.85	0.45 ± 0.04
A25	3619 ± 288	65.29 ± 3.76	0.33 ± 0.03
A40	3912 ± 145	57.40 ± 2.38	0.27 ± 0.02

5.2.2.- Modelo de flexión de baja energía.

Uno de los problemas que aparecen en la realización de los ensayos a impacto es la interpretación de las curvas experimentales en presencia de efectos dinámicos. Aunque las curvas no pierden su aspecto es necesario aplicar una corrección gráfica para evitar los inconvenientes que las oscilaciones introducen en la lectura de la curva registro. La modificación consiste en aceptar como representación válida la que transcurre a través de los puntos medios de los picos registrados. La figura 5.32 muestra una curva experimental obtenida durante el ensayo y la corrección aplicada.

La corrección afecta fundamentalmente al primer pico de la curva que es un efecto inercial relacionado con la deceleración del impactor y su primer contacto contra la placa [Turner 1988], [Chivers 1990] y que por tanto no es relevante para el comportamiento de la muestra. El tiempo de contacto (t_c) se determinó experimentalmente como el tiempo transcurrido hasta el punto en que la fuerza volvía a ser cero.

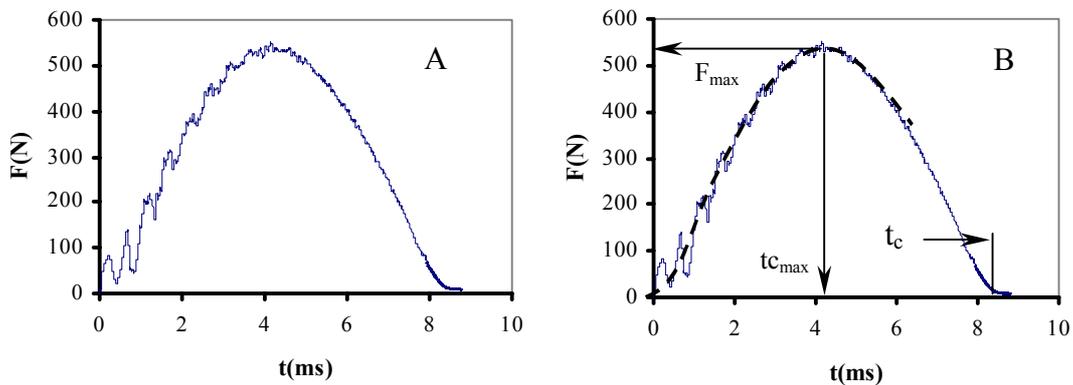
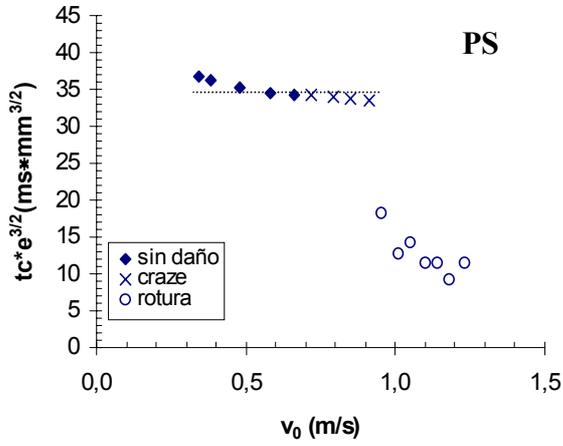


Figura 5.32.- Gráfico original (A) y corrección de efectos dinámicos (B).

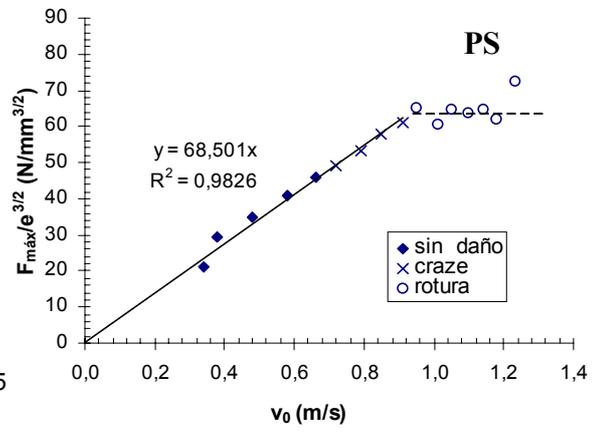
A lo largo de los ensayos se estudiaron las relaciones existentes entre el tiempo de contacto y la fuerza máxima frente a la velocidad inicial del péndulo. Para evitar en lo posible la variabilidad que pudieran introducir las pequeñas diferencias en el espesor o altura de las probetas, el tiempo de contacto y la fuerza máxima se han normalizado respecto del espesor. La evaluación de los cambios sufridos por la probeta tras el impacto se realizó por observación visual de las muestras.

En los gráficos siguientes se representan los registros experimentales obtenidos para el tiempo de contacto y la fuerza máxima en función de la velocidad de caída del dardo para cada uno de los materiales empleados.

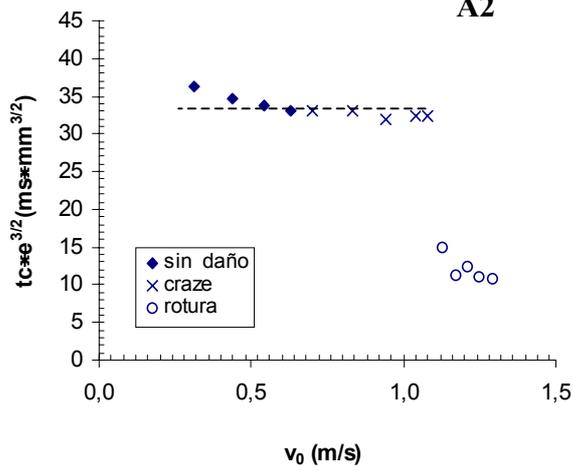
A: Tiempo de contacto



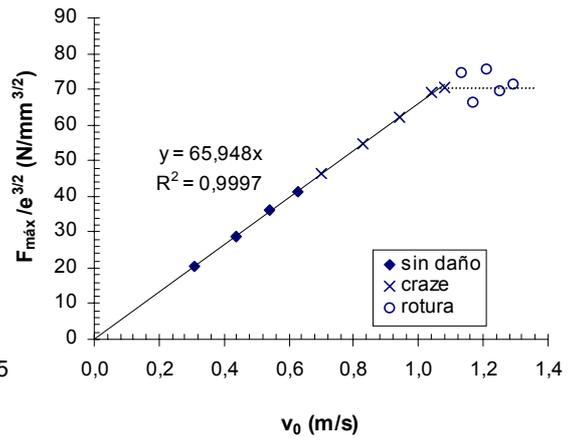
B: Fuerza máxima



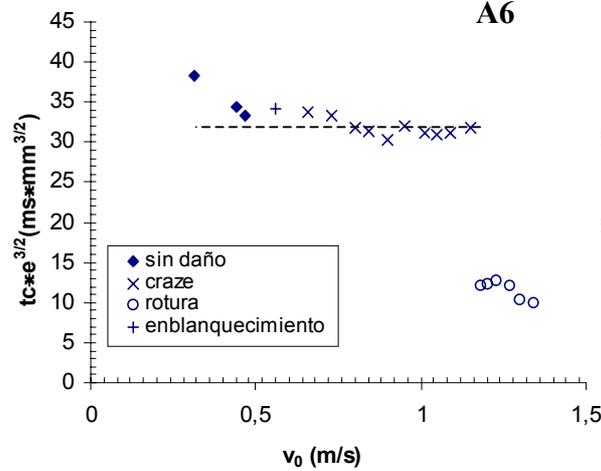
A2



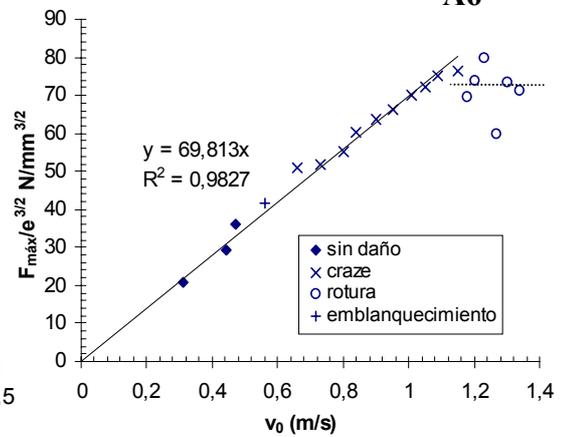
A2

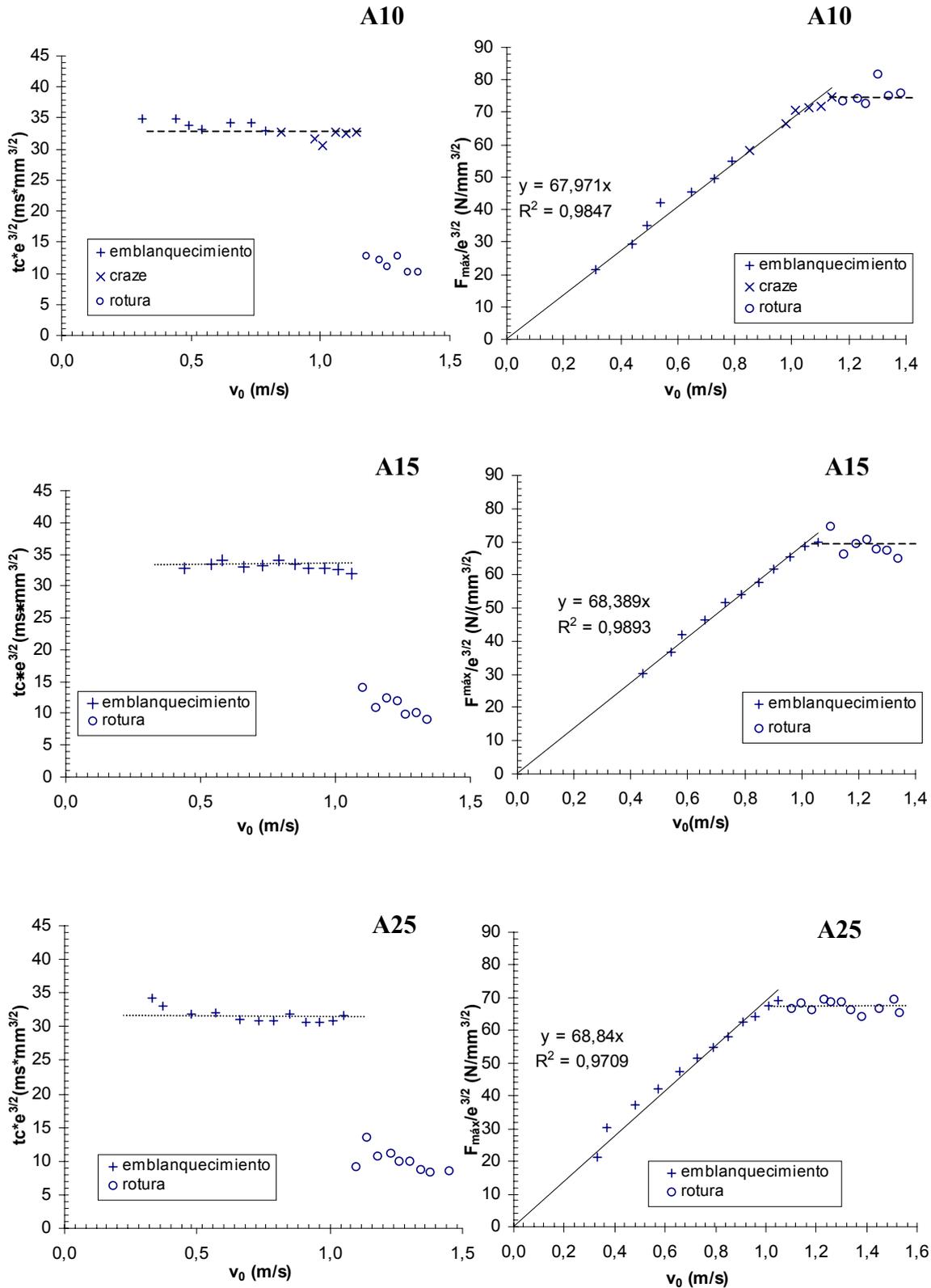


A6



A6





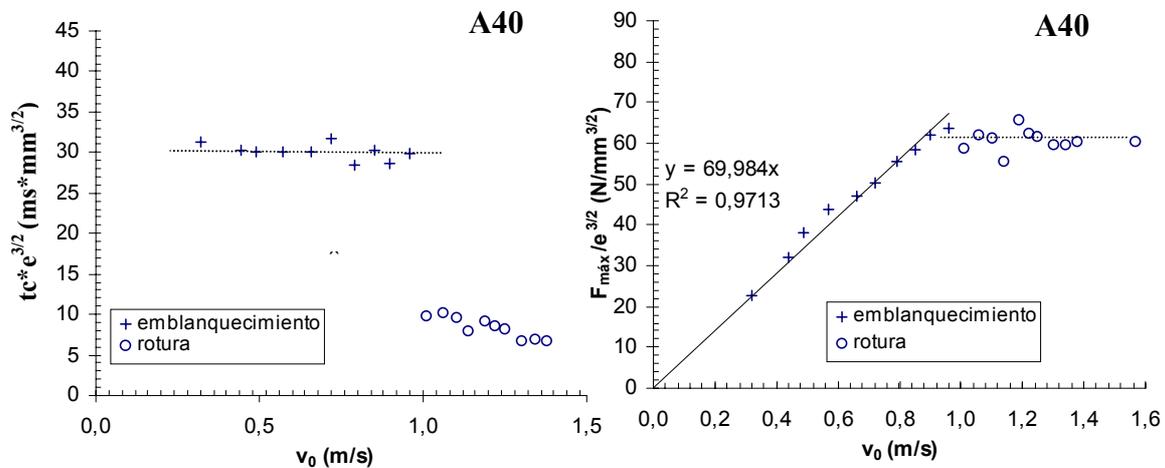


Figura 5.33.-(A).-Evolución de los valores experimentales del tiempo de contacto
 (B).-Evolución de la fuerza máxima en función de la velocidad del impacto.

De acuerdo con el modelo planteado el tiempo de contacto debe permanecer aproximadamente constante pues depende de la masa que se hace caer que no varía y de la rigidez del material. Por su parte la fuerza máxima debe incrementarse por cuanto en los ensayos incrementamos la altura de caída y por consiguiente la velocidad y la energía previa al impacto. Conocidas estas tendencias, en el rango de validez del modelo, las divergencias serán debidas a fenómenos que afecten fundamentalmente a la rigidez de la probeta o al incumplimiento de las hipótesis iniciales.

En las representaciones gráficas del tiempo de contacto frente a la velocidad (figuras A) destacan dos comportamientos diferenciados: En primer lugar aparecen una serie de puntos situados en la zona de bajas velocidades y altos tiempos de contacto, correspondientes a la respuesta de las probetas sin daño, con crazing y emblanquecimiento. En segundo lugar existe otra agrupación con tiempos de contacto mucho más bajos que se corresponde con las probetas que sufrieron rotura.

En las muestras que no se dañaron se verifica que el tiempo de contacto promedio coincide con el doble del necesario para alcanzar la fuerza máxima, lo que indica una simetría central respecto del punto de máximo esfuerzo, característica de una semisinusoide y que corrobora las hipótesis del modelo en la zona elástica. En las muestras fracturadas el gráfico fuerza-tiempo desciende bruscamente después de alcanzar la fuerza máxima, en consecuencia, la curva es notablemente asimétrica y el tiempo de contacto cae a su valor más bajo. En esta situación el modelo planteado deja de tener validez.

Cuando la velocidad de impacto es muy baja, en alguna de las muestras se produce una desviación al alza de t_c . La discrepancia viene asociada a una influencia relativamente mayor del error experimental cuando las velocidades son pequeñas o bien a una deficiente resolución y sensibilidad del aparato a la menor altura de caída utilizada, $h=5$ mm, que constituye por otro lado, el límite inferior de trabajo del equipo. A velocidades crecientes la respuesta es, en consonancia con el modelo, paralela al eje X.

Los tiempos de contacto correspondiente al crazing en las muestras PS, A2, A6 y A10 tienen un valor ligeramente menor que las que no sufren daño. Esto parece indicar que la aparición de un mecanismo inelástico modifica la curva respuesta de la probeta. En un principio si cuando surge el crazing disminuye el tiempo de contacto, debería esperarse que a mayor extensión del crazing correspondiera un tiempo de contacto menor desembocando en una recta con pendiente negativa respecto del eje X.

Experimentalmente las diferencias obtenidas son poco significativas señalándose sobre los gráficos el valor medio de los tiempos de contacto. Una razón que justifica la escasa variabilidad del tiempo de contacto es que el crazing se produce en una zona muy local con baja disipación energética, sin pérdida del carácter elástico global de las probetas ensayadas y con apenas cambio en la rigidez de la probeta.

En las muestras de poliestireno puras, el crazing se detecta por la aparición en la zona impactada de una pequeña región que a simple vista está formada por bandas filamentosas y brillantes cuyas direcciones son aproximadamente coincidentes con la dirección del flujo de inyección y su perpendicular. La existencia de alguna orientación molecular tras el procesado explicaría que el crazing aparezca preferentemente en los puntos de ligazón entre cadenas.

La observación microscópica de la zona dañada bajo luz polarizada (figura 5.34) revela la apariencia de las bandas como arrugas del material surcadas ortogonalmente por otras estrías secundarias más finas. Visto a través del microscopio de reflexión (figura 5.35), el crazing en una de las direcciones de orientación aparece como unas líneas o bandas oscuras que son consecuencia de la diferente reflexión de la luz con respecto de la matriz.

A bajos contenidos de carga se aprecia con facilidad la aparición del crazing como paso previo a la rotura del material, sin embargo, y a diferencia de la matriz pura, no existió una dirección preferente en cuanto a su disposición sobre la probeta. El efecto isotrópico promovido por las microesferas de vidrio junto con su capacidad para nuclear crazes limita la manifestación de la orientación molecular.

A medida que el porcentaje de esferas aumenta (muestras A6-A10) se observa la aparición de una zona emblanquecida en la superficie de contacto y restringida a la vecindad de la zona impactada (figura 5.36) que se asocia de forma principal al inicio de formación de vacíos consecuencia de la separación de fases partícula-matriz y en segundo lugar, parcialmente, a la rotura de fibrillas de matriz polimérica. En las muestras con menos carga no se aprecia emblanquecimiento pues ante la poca entidad del fenómeno predomina la transparencia de la matriz. En las muestras opacas (A15-A25-A40) el emblanquecimiento es notable en primer lugar por afectar a un número mayor de partículas y en segundo lugar por efecto del contraste contra la superficie de la probeta. El fenómeno del emblanquecimiento impide apreciar la separación de fases y el crazing subsiguiente.

Después del despegue inicial de algunas partículas un incremento en la energía de choque hace que un mayor número de ellas prosiga este camino. Si se sigue aumentando la energía se alcanza un determinado nivel en el que se nuclea crazing y/o una fisura que se origina preferentemente entorno a una de las partículas y evoluciona creciendo a través de la matriz. (figura 5.37). La aparición de una grieta y su posterior crecimiento no detiene el proceso de separación carga-matriz dado que en otras zonas más alejadas de la zona de impacto o en planos intermedios de la probeta puede no haberse alcanzado el nivel tensional necesario para promover la separación de la carga.

A energías de impacto mayores la presencia de grietas provoca la pérdida en la compliance de la probeta y el cambio brusco de la forma de la curva respuesta con caída rápida de la carga a cero. En este momento el tiempo de contacto adquiere un valor por debajo de la mitad de los anteriormente registrados.

Los registros fuerza versus velocidad del impacto (gráficos B) son, para todas las muestras examinadas, altamente lineales hasta el momento de la fractura. Mientras las probetas no sufren daño es evidente que a mayor altura de caída, y por tanto a mayor velocidad, la fuerza de colisión debe crecer. Cuando aparece emblanquecimiento y las microesferas se separan de la matriz, todavía la matriz puede resistir un esfuerzo creciente e incluso las esferas pueden soportar carga en la mitad de la probeta que se encuentra a compresión.

En el momento de aparición del crazing sería aceptable pensar que la fuerza soportada por la matriz debería caer y por lo tanto perderse la linealidad de las curvas. El material puede soportar un nivel creciente de carga y mantener la proporcionalidad porque como se sabe las microfibrillas que constituyen la craze son tiras de material altamente elongadas que pueden transmitir esfuerzos entre ambas caras de la craze.

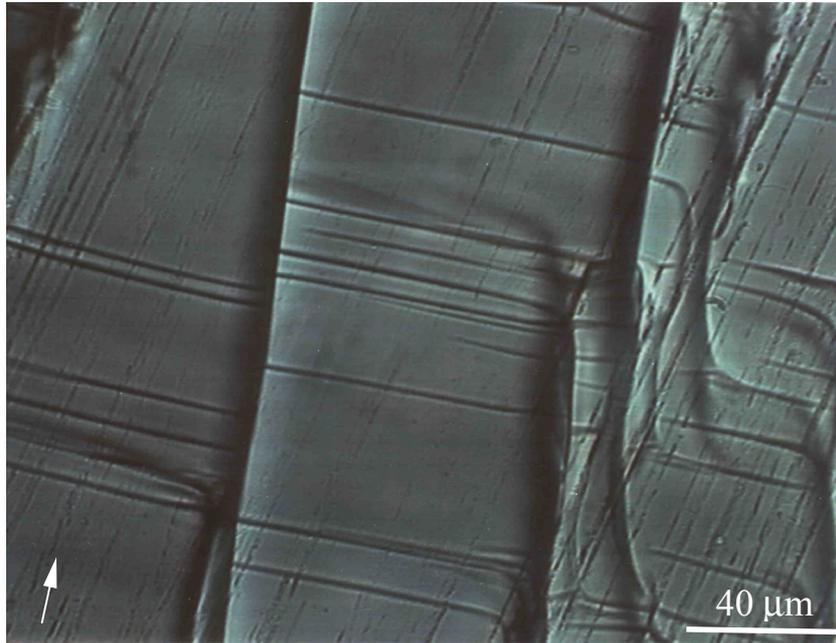


Figura 5.34.- Crazing producido por impacto de caída de dardo. Vista superficial al microscopio de transmisión bajo luz polarizada. La flecha indica el sentido del flujo de inyección.

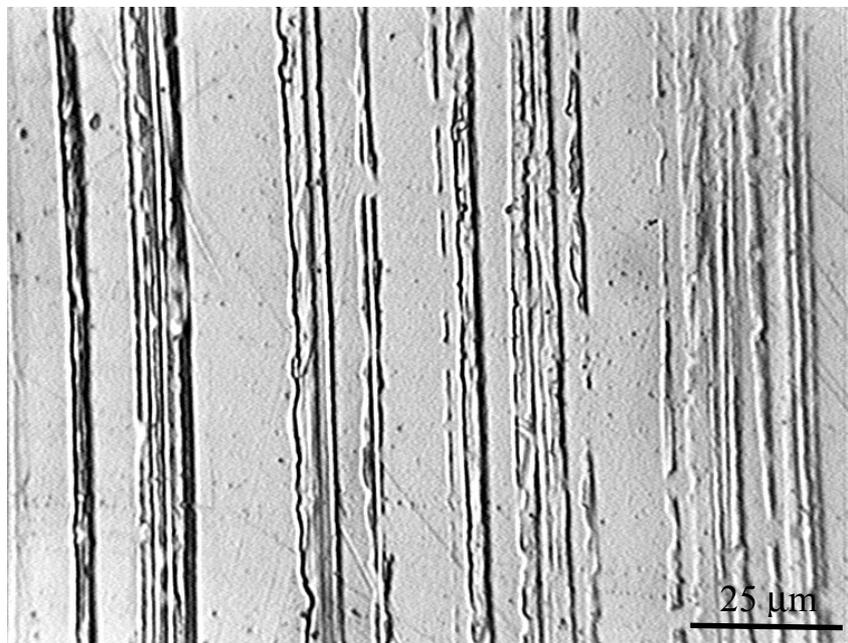


Figura 5.35.- Crazing generado por impacto en una probeta con flujo orientado. Vista a través del microscopio de reflexión.

Figura 5.36.- Zona de emblanquecimiento tras impacto. Inicio separación fases.

Figura 5.37.- Crecimiento de fisura entorno de una microesfera separada de la matriz. Las áreas difuminadas son las zonas de emblanquecimiento de la probeta.

Se verifica que los puntos correspondientes a la aparición del crazing se encuentran alineados con el resto de datos, salvo los correspondientes a la aparición de la rotura. El cambio de rigidez de las probetas por aparición del crazing no es apreciable a través de la fuerza máxima siendo para este aspecto más sensible el tiempo de contacto.

Una vez se ha producido la rotura el valor de la fuerza se vuelve más variable oscilando entorno de un nivel ligeramente por debajo del máximo registrado, pudiéndose trazar una asíntota horizontal que correspondería a la fuerza umbral necesaria para que aparezca una grieta catastrófica en el material.

Prestando atención a la evolución de la fuerza con el porcentaje de carga de las curvas se extrae que la soportada por la probeta aumenta con el porcentaje de carga añadido hasta alcanzar un máximo en la muestra A10 a partir de la cual comienza a disminuir progresivamente.

Para las muestras sin carga o con concentraciones de carga moderadas (PS, A2, A6, A10 y A15) se observó una rotura en estrella (figura 5.38) a partir del centro del disco con grietas radiales dirigidas hacia los bordes que dependiendo del esfuerzo podían alcanzarlos. La rotura en forma de estrella es indicativa de la isotropía de la muestra.

En todos los casos la fractura fue frágil con propagación rápida de grieta, evidenciando la superficie un aspecto liso con aumento de rugosidad en paralelo al porcentaje de esferas añadido.

El proceso de rotura de las muestras con más carga (A25-A40), aunque más estable, produjo una grieta longitudinal orientada hacia el punto de inyección (figura 5.39). A pesar de la isotropía de las microesferas el flujo del fundido dentro de la figura en forma de disco favorece una distribución de las partículas heterogénea. Cuando existe una cantidad de carga muy elevada de microesferas, el flujo molecular queda restringido promoviendo la orientación de las cadenas de polímero en la dirección de la inyección. La presencia local de zonas con alta densidad de partículas y las restricciones a la relajación molecular que éstas imponen son causas adicionales de la fractura direccional.

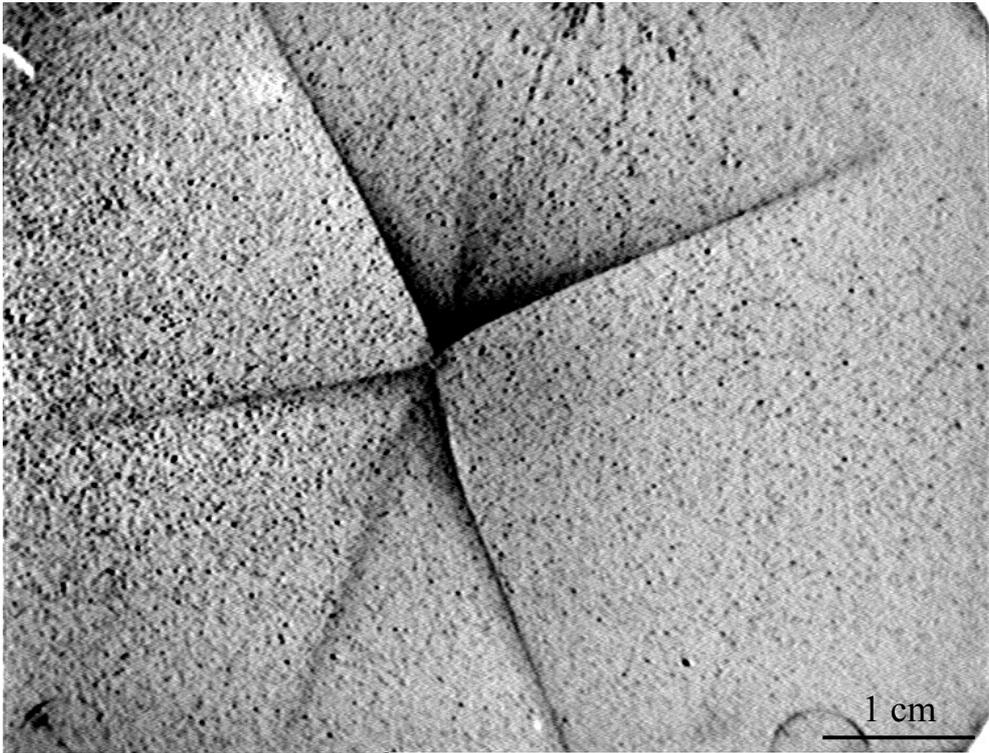


Figura 5.38.- Rotura en estrella por impacto de caída de dardo. Muestra A10.

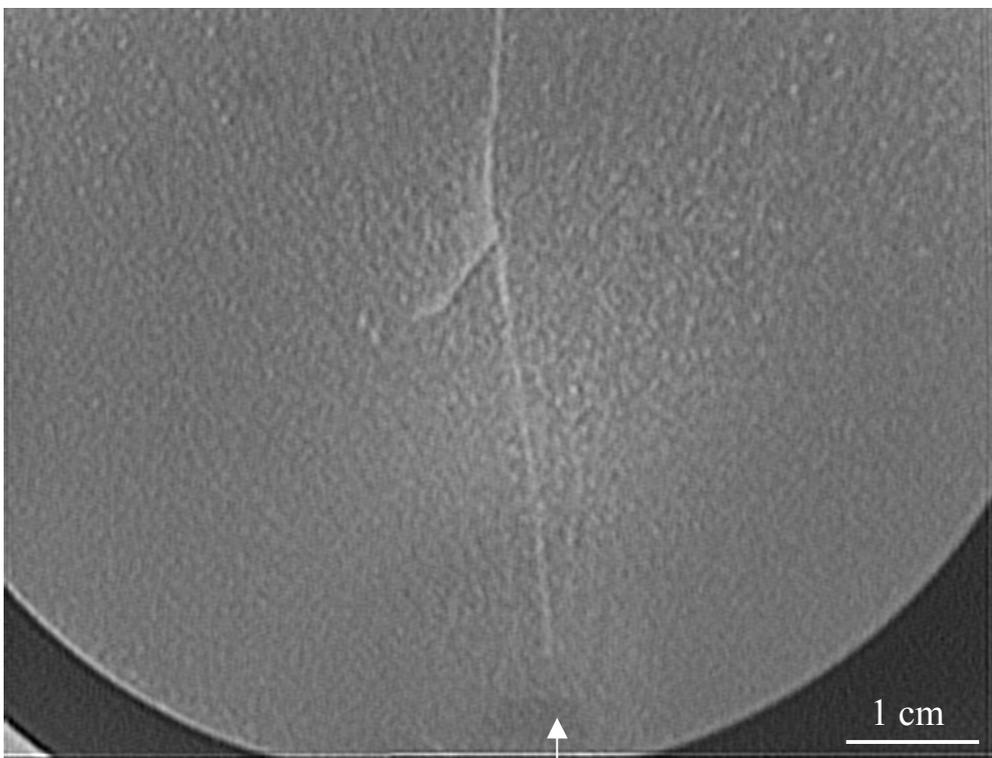


Figura 5.39.- Rotura direccional causada por impacto de caída de dardo. Muestra A25. La flecha indica el punto de inyección y dirección del flujo.

5.2.1.1.- Determinación del módulo elástico.

Los valores de los módulos de elasticidad se calcularon de forma independiente:

- a) A través de la fuerza máxima $E_{F_{max}}$.
- b) A través de los tiempos de contacto E_{tc} .

En el procedimiento de la fuerza máxima introducimos en la ecuación 4.49 el valor de la pendiente de las representaciones $F_{max}/e^{3/2}$ vs. v_0 para todos los puntos que no sufrieron rotura, incluyendo los relativos a emblanquecimiento o con crazing. En el caso del tiempo de contacto se hizo uso de la ecuación 4.52.

La tabla 5.10 y las gráficas 5.40 y 5.41 reflejan el resumen de valores obtenidos.

Tabla 5.10.- Valores medios del módulo de elasticidad obtenido a través de la fuerza máxima y el tiempo de contacto.

MUESTRA	PS	A2	A6	A10	A15	A25	A40
$E_{F_{max}}$ (MPa)	3161	2933	3293	3129	3176	3240	3385
E_{tc} (MPa)	2859	3097	3238	3157	3174	3493	3723

En las curvas puede apreciarse como la mayor separación en los datos ocurre a las velocidades más reducidas observándose dos poblaciones de puntos diferenciadas, en la parte superior las correspondientes a las muestras A25 y A40 mientras que el resto de composiciones están menos diferenciadas. A velocidades mayores los datos tienden a agruparse.

En el rango de velocidades estudiadas el módulo se mantiene aproximadamente constante. Cuando la velocidad de impacto es más baja existe una variación mayor de los resultados debido a la insuficiente resolución del aparato de caída de dardo.

Los valores del módulo elástico derivados del tiempo de contacto son más sensibles a variaciones físicas de la muestra en estudio pero están sujetos a una mayor variabilidad experimental, principalmente debido a la lectura del tiempo de inicio y final del ensayo, que pese a las correcciones efectuadas se ve afectada por los efectos dinámicos producidos tanto al inicio del suceso como a su término. Los valores obtenidos a partir de la representación de la fuerza máxima tienen una mayor estabilidad en su lectura porque las oscilaciones entorno al valor de la fuerza son menores. Sin embargo el método es menos sensible a los cambios de rigidez de la pieza.

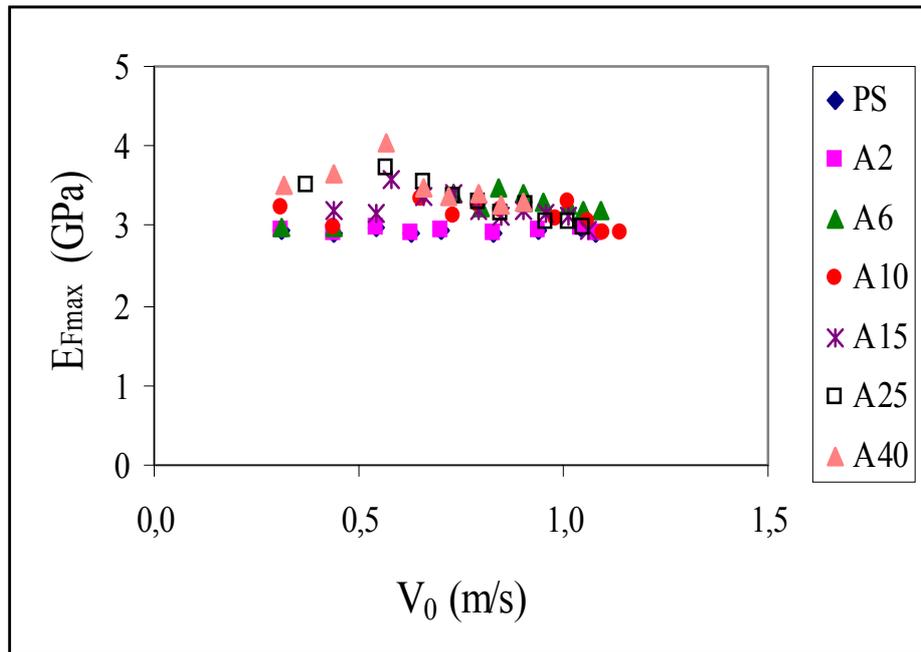


Figura 5.40.- Módulo elástico determinado a partir de la fuerza máxima en función de la velocidad del ensayo.

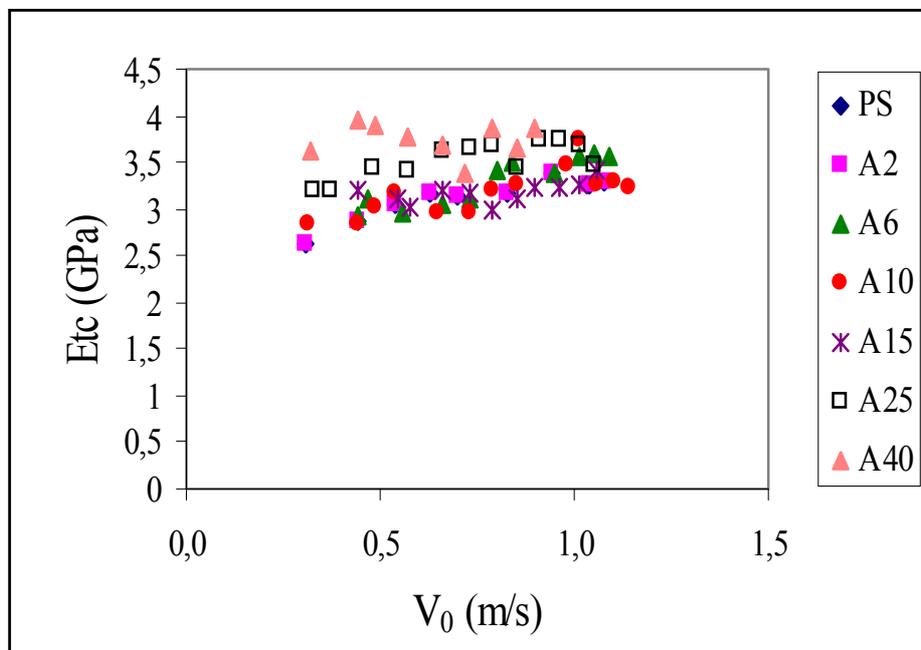
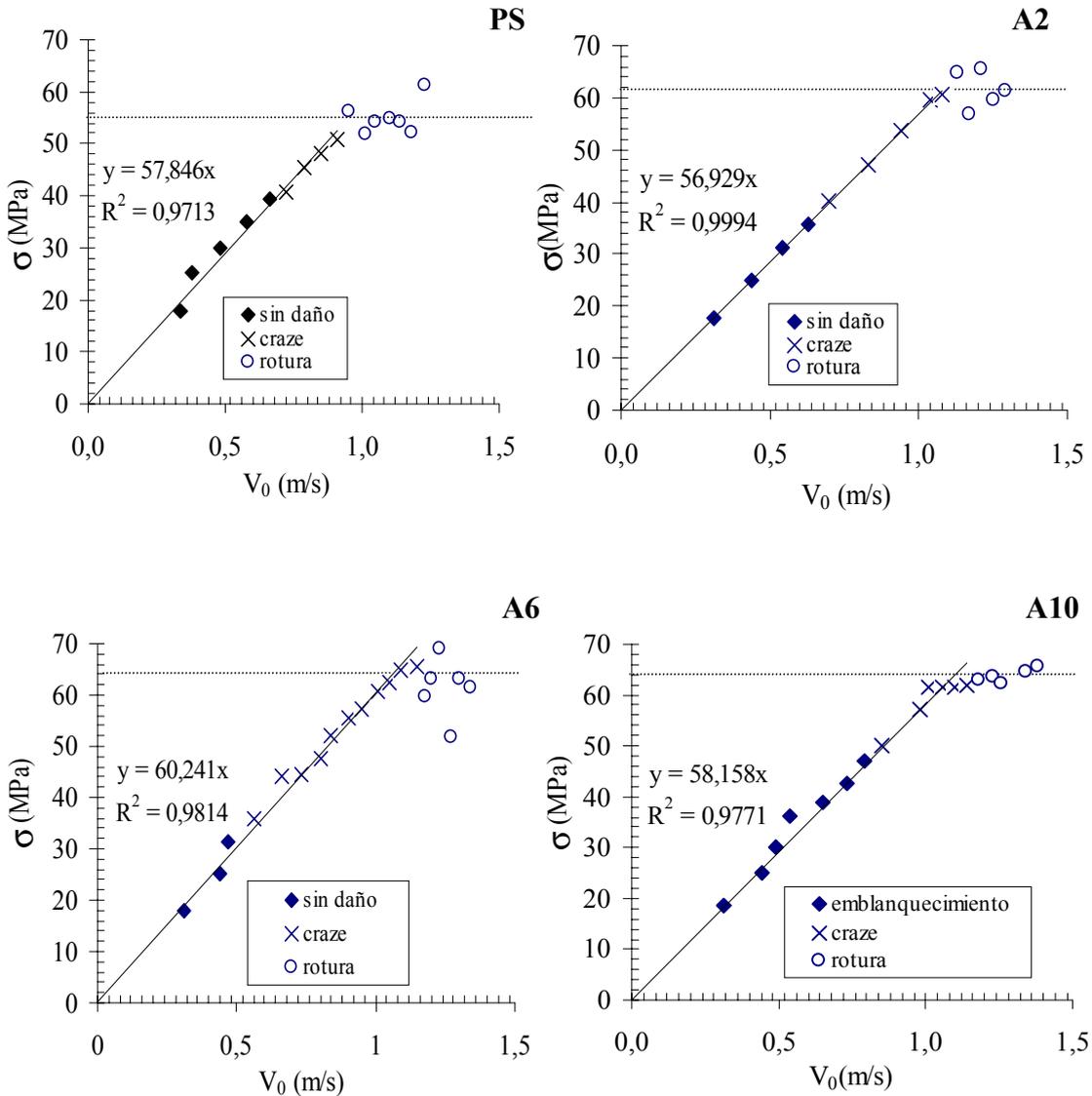


Figura 5.41.- Módulo elástico determinado a partir del tiempo de contacto en función de la velocidad del ensayo.

5.2.1.2.- Determinación de las tensiones en la cara de tracción.

Los valores de las tensiones en flexión determinadas en la cara de tracción y en función de la velocidad de caída del dardo se representan en los gráficos contenidos en la figura 5.42



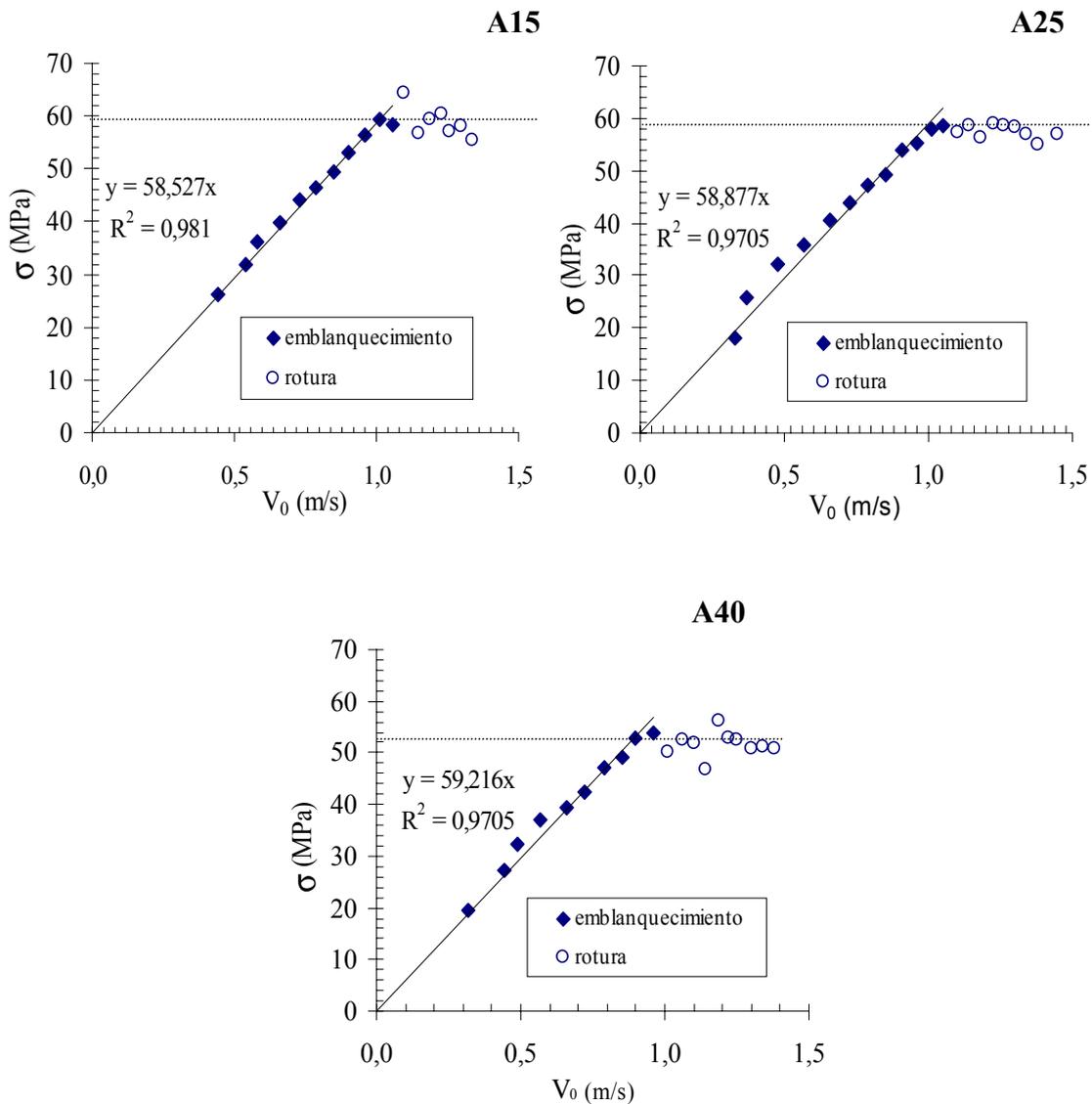


Figura 5.42.- Tensiones en la cara de tracción en el ensayo de flexión por impacto de baja energía

Frente a la velocidad del ensayo la tensión tiene dos tendencias claramente diferenciadas. Inicialmente y cuando la velocidad de ensayo es baja, se mantiene la proporcionalidad entre tensión y velocidad. A partir de una cierta velocidad crítica (≈ 1 m/s) la tendencia se vuelve asintótica y paralela al eje X. Esta velocidad determina el inicio de la rotura total o parcial de la probeta siendo el valor de la tensión umbral función del material y de la configuración propia del ensayo.

Respecto del porcentaje de carga, la tensión presenta un máximo en las composiciones intermedias y el mínimo para la muestra con mayor contenido mineral indicando un cierto refuerzo asociado a la introducción de las esferas. En las gráficas puede observarse que la distribución de los puntos correspondientes a las muestras fracturadas tiene una menor variabilidad conforme se incrementa el porcentaje de carga añadido, fenómeno que se relaciona con la mayor estabilidad de la fractura.

La tensión de inicio del crazing se sitúa entorno de los 45 MPa como valor promedio de las composiciones y de 40.5 MPa. para el poliestireno. En las muestras con mayor porcentaje de microesferas (A15, A25 y A40) no ha sido posible determinar el momento de inicio del crazing ya que la introducción de las microesferas produce como efecto indeseable la opacidad de la probeta.

El resumen de resultados de tensiones correspondientes a los diferentes sucesos observados se recoge en la tabla 5.11.

Tabla 5.11.– Tensiones registradas en el ensayo de flexión por impacto de baja energía.

MUESTRA	$\sigma_{\text{EMBLANQUECIMIENTO}}$ (MPa)	σ_{CRAZE} (MPa)	σ_{ROTURA} (MPa)
PS	-	40.5	54.9
A2	-	47.0	61.5
A6	-	44.1	61.4
A10	18.6	49.3	64.8
A15	19.2	-	58.8
A25	18.1	-	57.2
A40	19.4	-	51.9

La flexión e indentación causadas en la probeta a resultas del choque tiene como consecuencia la separación de las partículas y de la matriz, al menos en la cara de la probeta que soporta esfuerzos tensiles. La separación de las fases hace que la probeta se emblanquezca en la región próxima al impacto. La tensión para producir el emblanquecimiento mantiene un valor casi constante y que hemos situado en los 18.6 MPa., siendo mayor a la encontrada en el ensayo de uniaxial de tracción. La diferencia de valores respecto del ensayo de tracción es consecuencia del cambio en las condiciones de deformación de la probeta.

La uniformidad en los valores de la tensión de emblanquecimiento refuerza la hipótesis que el fenómeno se origina como resultado de la cavitación de las partículas. La figura 5.43 muestra la evolución de los parámetros determinados en relación con el contenido de carga.

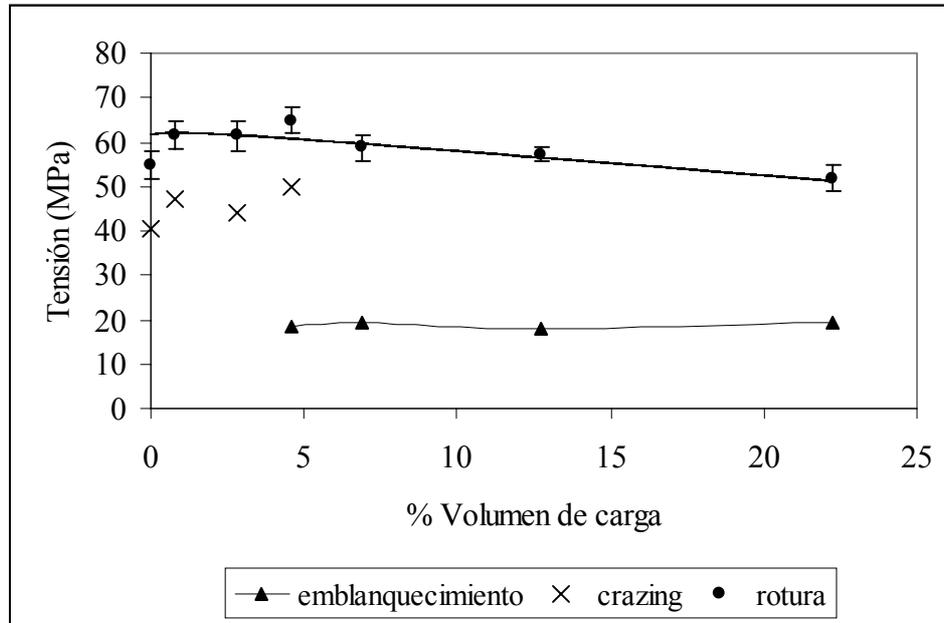


Figura 5.43.- Evolución de las tensiones de emblanquecimiento, crazing y rotura en el ensayo de impacto por caída de dardo.

5.2.2.- Modelo de indentación.

El modelo de indentación combina la solución dinámica del contacto entre dos cuerpos con la solución estática de la presión entre dos sólidos y permite, a partir de las ecuaciones desarrolladas en el apartado 4.2.2.1, describir la respuesta mecánica de los materiales en el campo elástico. Así, es posible determinar valores característicos del material como es el caso del módulo de elasticidad sin destruir la muestra.

A través de este método se obtienen dos magnitudes que definen el fenómeno del impacto: la fuerza ejercida sobre la superficie de la probeta y el tiempo de contacto entre impactor y muestra.

En este modelo no ha sido necesario aplicar corrección por efectos dinámicos puesto que debido a la reducida velocidad con la que se golpea la muestra, apenas si aparecen oscilaciones sobre la curva. Por otra parte la colocación de una plancha metálica rígida por debajo de la probeta impide en gran manera su vibración durante el contacto. En la figura 5.41 se representa una curva típica correspondiente a una indentación.

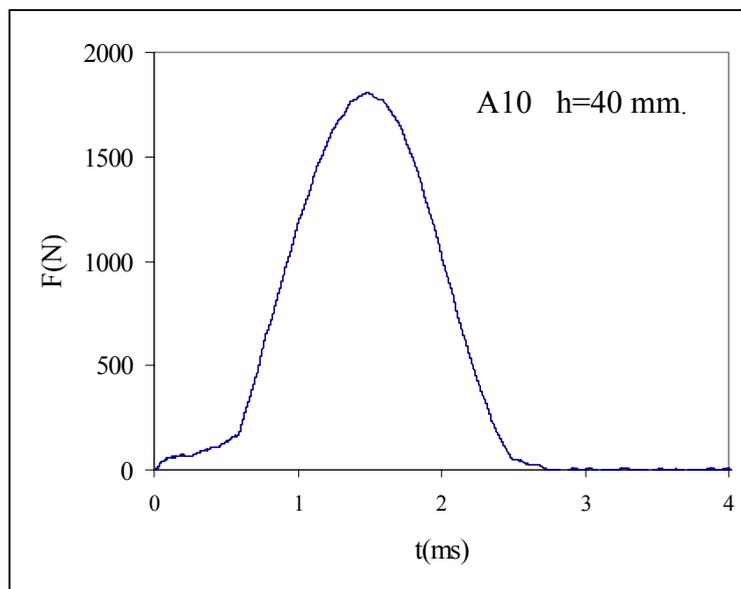
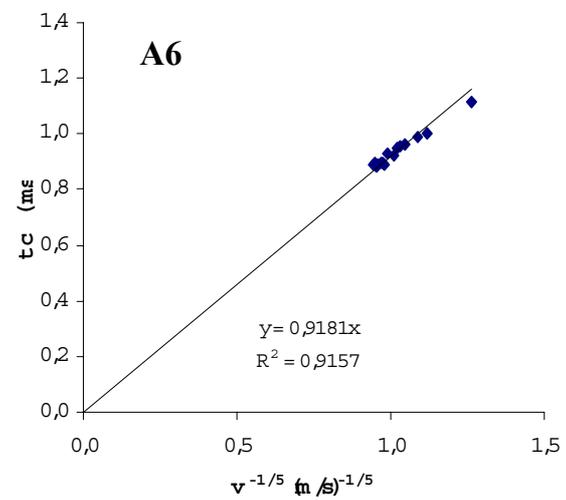
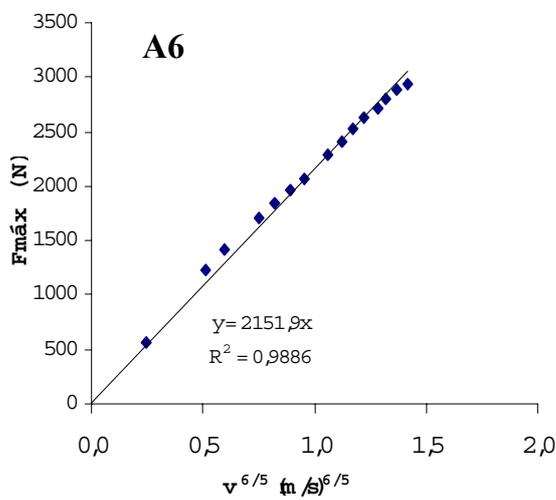
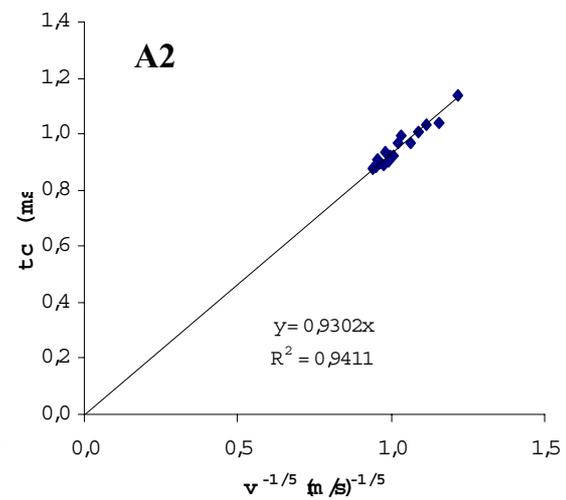
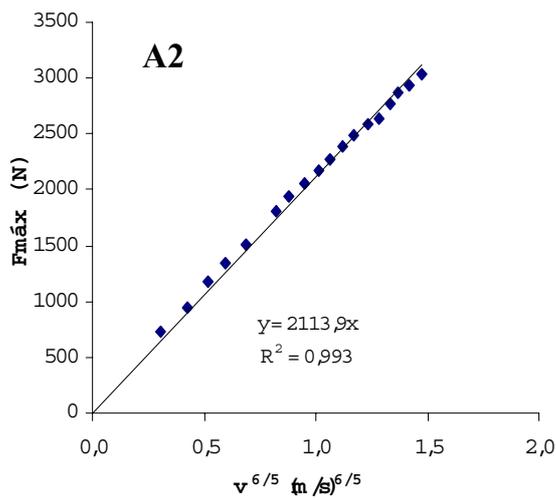
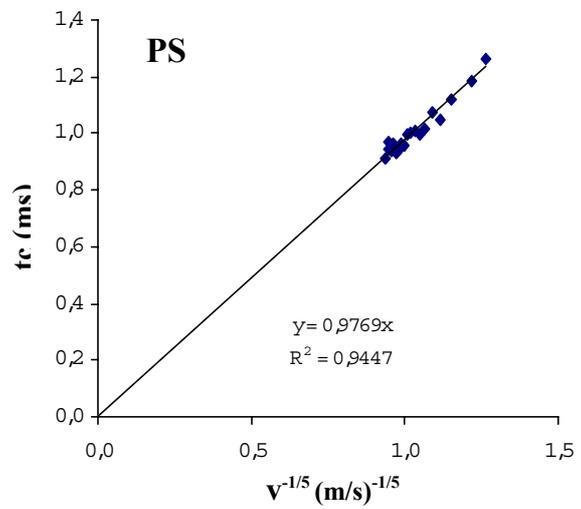
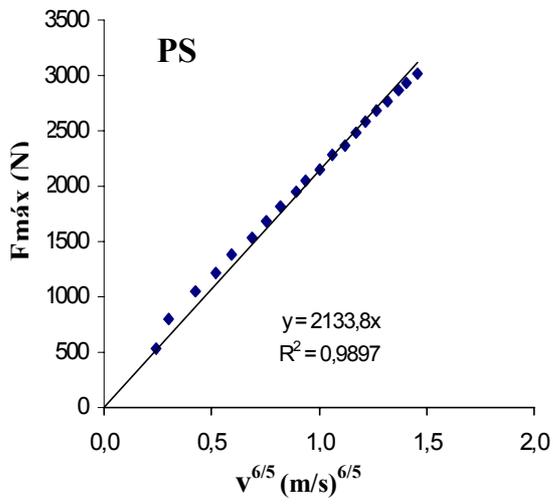
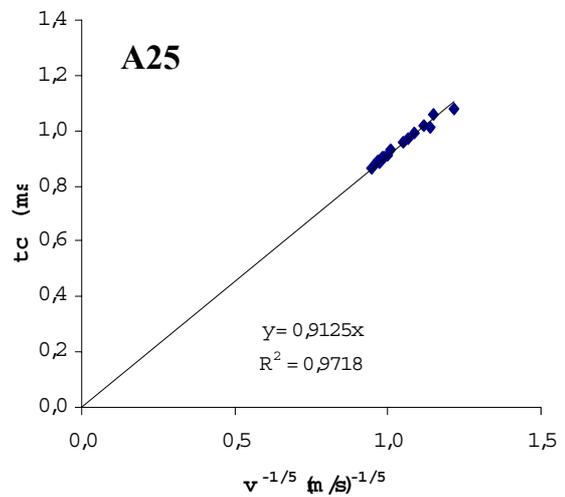
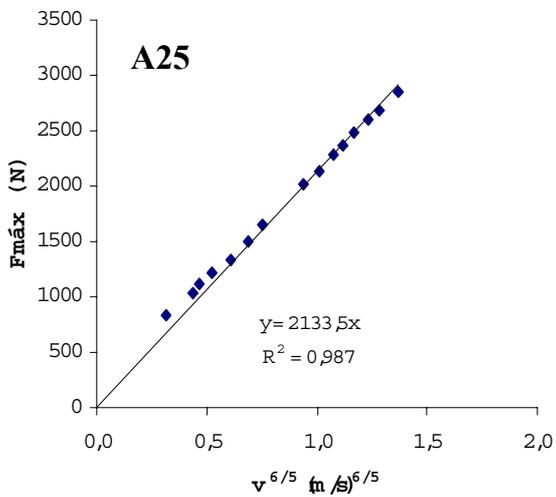
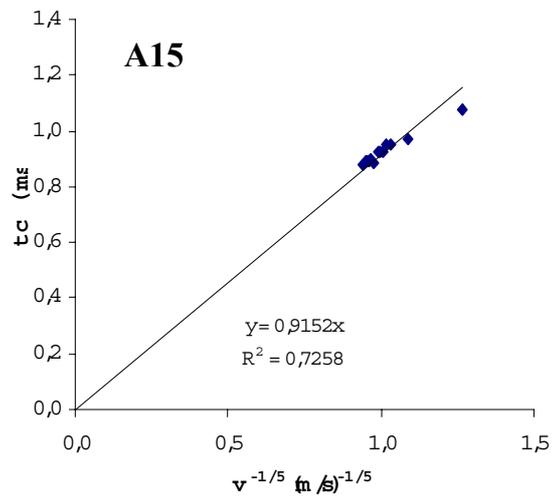
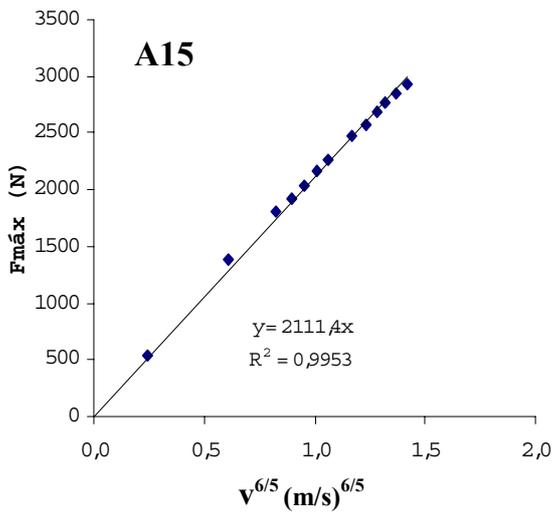
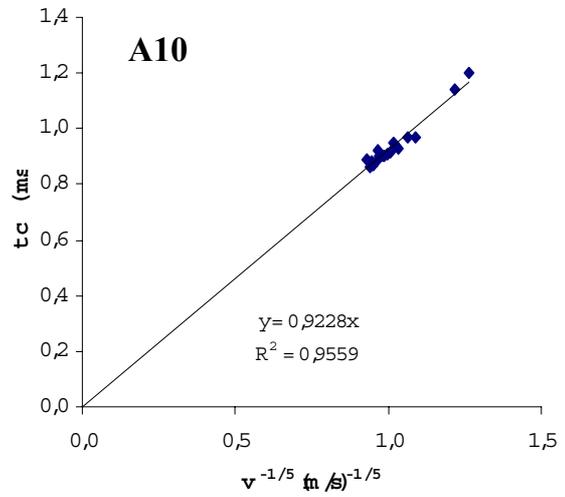
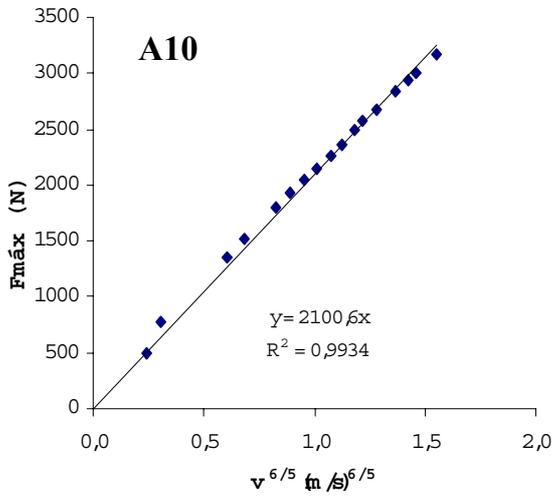


Figura 5.44.- Forma típica de una curva resultado del ensayo de indentación .

Tomando como módulo elástico del acero $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ y adoptando un coeficiente de Poisson del acero de 0.3 la rigidez del impactor resulta ser $k_1 = 1.38 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$. Para el cálculo de los valores del módulo de Young a partir de los datos experimentales es necesario extraer las pendientes de las curvas F_{\max} vs $v_0^{6/5}$ y t_c vs. $v_0^{-1/5}$ cuya representación se muestran a continuación:





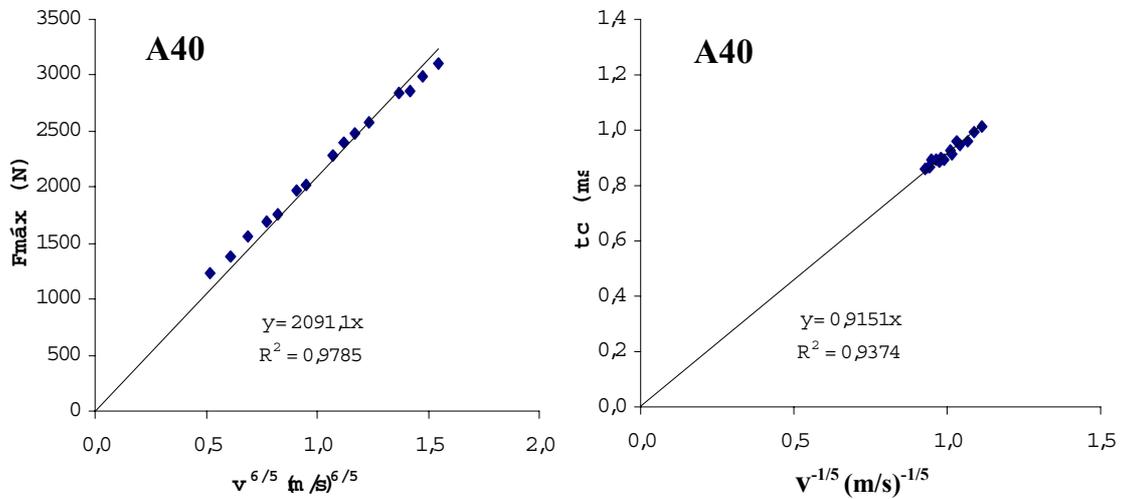


Figura 5.45.- Gráficos experimentales obtenidos por indentación.

Los gráficos reflejan una relación altamente lineal para todas las composiciones, que es especialmente buena en la representación gráfica de la fuerza máxima vs. $v^{6/5}$. El contacto entre el impactor y la probeta se desarrolla durante un estrecho margen de tiempo, en consecuencia los valores de los tiempos de contacto quedan agrupados en una pequeña franja del eje Y, por lo que la correlación lineal entre t_c y $v^{-1/5}$ está afectada por un mayor nivel de incertidumbre.

Tabla 5.12.- Valores del módulo de Young y parámetros del ensayo de indentación.

MUESTRA	$E_{\text{Ind}}(\text{MPa})$	$F_{\text{max}} \cdot v^{6/5}$ [N/(m/s) ^{6/5}]	$t_c \cdot v^{-1/5}$ [10 ⁻³ s/(m/s) ^{-1/5}]	n MPa mm ^{-1/2}
PS	3019	2134	0.977	11140
A2	3223	2114	0.930	11878
A6	3352	2152	0.918	12331
A10	3250	2101	0.923	11945
A15	3314	2111	0.915	12157
A25	3378	2133	0.912	12338
A40	3317	2091	0.915	12042

En la tabla 5.12 se incluyen los módulos de Young junto con las pendientes de los gráficos anteriormente representados y el valor de la constante n.

Los resultados encontrados implican que el modelo se verifica pues las desviaciones tanto en las gráficas [F_{max} vs $v^{6/5}$] como en [t_c vs $v^{-1/5}$] respecto de la linealidad teórica son muy pequeñas, con coeficientes de correlación muy altos. Por otra parte también se cumple la hipótesis de que n debe mantenerse constante independientemente del material.

El módulo de Young obtenido por indentación tiende a aumentar a medida que la proporción de microesferas en la mezcla aumenta aunque las diferencias entre composiciones son pequeñas y resultan menores de lo esperado en las dos muestras con más carga.

Si se comparan los resultados de los módulos obtenidos por indentación con los previamente reflejados de flexión, en general se verifica que ambos métodos proporcionan magnitudes similares y coherentes con las características del material de manera que podemos asegurar la validez de las metodologías en la determinación de los módulos elásticos de los materiales a velocidades elevadas.

5.2.3.- Resumen.

Los métodos de ensayo de caída de dardo constituyen una metodología adecuada para evaluar la respuesta de los compuestos poliestireno-microesferas de vidrio en el campo elástico y bajo esfuerzos dinámicos ejercidos a medias y altas velocidades.

La aplicación de la técnica de flexión de alta energía a los compuestos poliestireno-microesferas de vidrio ha proporcionado en todos los casos curvas respuesta lineales hasta el momento de la rotura que se ha producido de manera frágil. La pérdida de velocidad del dardo siempre ha sido inferior al 10% y la deformación máxima se ha mantenido dentro del rango elástico dando validez al método. Los valores de módulo elástico obtenido a través de la aplicación de esta técnica están, en general, ligeramente por encima de lo obtenido con otros métodos, sobretodo en las muestras más cargadas. Este efecto es debido a una mayor contribución de los efectos dinámicos.

El modelo de flexión de baja energía ha demostrado ser satisfactorio para la determinación de los fenómenos de aparición de daño y fractura en las probetas ensayadas. La representación del tiempo de contacto frente a la velocidad de ensayo es sensible a las desviaciones del modelo permitiendo diferenciar claramente el momento de la rotura de la probeta y en algunos casos la aparición del primer daño en forma de crazing. La determinación del módulo elástico de las muestras a través del tiempo de contacto o de la fuerza máxima ha conducido a valores semejantes entre si y coherentes con el comportamiento esperado de los materiales.

Con la aplicación del modelo de indentación se han obtenidos resultados de módulos elásticos similares a los de flexión. La principal ventaja asociada a este ensayo es la ausencia de efectos dinámicos y la no destrucción de la muestra.

La mejor metodología para la obtención de los parámetros elásticos a alta velocidad de deformación es para los materiales en estudio es el proceso derivado de la fuerza máxima en el modelo de flexión de baja energía.

Bajo impacto, las microesferas de vidrio en concentraciones bajas y moderadas, parecen tener un efecto reforzante sobre el material. A altas concentraciones desencadenan un fallo prematuro probablemente por coalescencia de vacíos. Se ha comprobado que el mecanismo de fallo es el despegue de partícula y la posterior formación de crazing entorno al vacío generado.

La tensión de inicio de crazing se ha establecido en 45 MPa. y la de emblanquecimiento en 18 MPa.