



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Doctorado en ingeniería de la construcción

**ACTIVACIÓN ALCALINA DE RESIDUOS
URBANOS E INDUSTRIALES PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE PIEZAS PREFABRICADAS**

Tesis doctoral realizada por:

Yineth Paola García Díaz

Dirigida por:

Albert De La Fuente Antequera

Ignacio Segura Pérez

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Barcelona, 28 de junio de 2023

Solo fuera de la cápsula puedes confirmar que nunca estuviste en ella, la teoría que
no tira del brazo de la experiencia, es como un sueño lúcido del que
vale pena despertar

YG

Agradecimientos

A todos quienes compartieron mi historia académica y saben lo que éste logro significa para mí, a todos aquellos se quitaron los prejuicios y me dieron lo único que necesitaba: Una oportunidad. A mis tutores por confiar en mí y siempre estar dispuestos y atentos ante cualquiera de mis aciertos o ideas fuera de orbita. A mis amigos de doctorado quienes siempre estuvieron dispuestos a levantar cualquier carga que no pude (y no hablo sólo de las probetas). A mis hermanas, que nunca han dudado de mí y por quienes mantuve un mayor compromiso. A mi madre, a mi padre y a mi abuela, a quienes siempre les deberé todo y para quienes de cierta forma este también es su doctorado.

Activación alcalina de residuos urbanos e industriales para la construcción de piezas prefabricadas

Yineth Paola García Díaz

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech

RESUMEN GENERAL

Se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de diversos subproductos industriales y urbanos con el fin de establecer su potencial como precursores en la producción de materiales activados alcalinamente (MAA) en España. Se identificaron más de 15 subproductos que podrían emplearse como precursores, los cuales se clasificaron según su naturaleza química, diferenciándose en cuatro tipologías: vidrios, cerámicos, escorias de acero y catalizadores gastados de craqueo catalítico. Para cada uno de estos materiales, se aplicaron varias técnicas de análisis químicos a fin de determinar su composición, su capacidad de disolución en medios alcalinos, así como análisis mecánicos para evaluar su capacidad de consolidación y resistencia.

Los resultados revelan que algunos subproductos carecían de reactividad debido a las características físicas y su composición química, los cuales requerían condiciones de activación muy específicas, pero en el marco del programa experimental de la tesis doctoral, era necesario establecer criterios generales que permitieran la comparación de la mayor cantidad posible de subproductos. Aunque no se logró la activación de todos los subproductos, se logró establecer las condiciones de activación requeridas para cada uno de ellos.

Destacaron especialmente los subproductos de vidrio, en particular la fracción no reciclable de vidrio de contenedor denominada (V-C+P), así como los subproductos cerámicos de ladrillo rojo (RDC) y Testillo cocido (TC), los cuales mostraron un mayor potencial de activación. Tras una serie de evaluaciones experimentales, en las cuales se definieron las condiciones óptimas de activación, el V-C+P exhibió un rendimiento sobresaliente. Para este material en particular, se establecieron las siguientes condiciones de activación óptimas en matrices de pasta, mortero y hormigón: una relación activador/precursor de 0,30, una solución activadora de NaOH 4M con un 1% de silicato de sodio en peso, un período de curado de 48 horas a una temperatura de 70°C, un tamaño promedio de partícula mínimo de 0,3 mm o una superficie específica de 54 cm²/g. Previamente a la obtención de estos valores, se logró cuantificar la

importancia de la finura, la capacidad de disolución, la influencia real del porcentaje amorfo y la limitada eficacia de los superplastificantes tradicionales en los MAA.

A través de análisis químicos y mecánicos de diversas pastas elaboradas con V-C+P, bajo distintas concentraciones de activador y relaciones activador/precursor, se determinó que los principales productos de reacción fueron el C-S-H y el N-A-S-H, llegando a representar hasta un 28% de la masa total. Dichas transformaciones químicas se caracterizaron por la conversión predominante de enlaces Si-O-Si a Si-O-Na, y es posible que a largo plazo se detecte la presencia de un compuesto que contribuye a la resistencia, tal como se evidencia en los análisis FT-IR y posiblemente en DRX.

A partir de los resultados obtenidos, se definió una formulación mejorada de MAA mediante la adición del 10% de cemento, el cual fue la base para el análisis de los elementos prefabricados. Como última optimización, se presenta una formulación adicional que combina subproductos cerámicos con un 30% de V-C+P, obteniendo resultados altamente favorables.

El MAA obtenido, mediante la implementación de un escalado industrial adecuado y un proceso de molienda y curado optimizado, muestra un destacado potencial para la fabricación de prefabricados de baja huella de carbono. Gracias a este MAA, no solo se logra un aprovechamiento eficiente de los materiales, sino que también se reduce en un 90% el consumo de cemento. Además, se demuestra que incluso al combinar el precursor de vidrio con el precursor cerámico tipo Testillo, es posible obtener un material alternativo con una elevada resistencia mecánica que cumple con los criterios de finura exigidos por las normativas aplicables. En conclusión, la presente investigación corrobora que el MAA obtenido a partir de la fracción no reciclable de vidrio cumple con los requisitos técnicos establecidos, a pesar de que la normativa actual restringe su implementación como cementante único en elementos prefabricados para construcción.

Alkali activation of urban and industrial by-products for the construction of precast elements

Yineth Paola García Díaz

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech

GENERAL ABSTRACT

A comprehensive evaluation of various industrial and urban by-products was conducted to determine their potential as precursors for alkali-activated materials (AAM) in Spain. Over 15 by-products were identified that could be used as precursors, classified into four categories based on their chemical nature: glass, ceramics, steel slags, and spent fluid catalytic cracking catalyst. Multiple chemical analysis techniques were applied to determine the composition and alkaline dissolution capacity of these materials, as well as mechanical analysis to assess their consolidation and strength properties.

The results revealed that some by-products exhibited low reactivity due to their physical characteristics and chemical composition, which required very specific activation conditions. However, within the experimental framework of the doctoral thesis, general conditions were established to assess and evaluate as many by-products as possible. While activation was not achieved for all by-products, the required activation conditions were determined for each one.

Glass by-products, particularly the non-recyclable fraction of container glass (V-C+P), and ceramic by-products such as red brick ceramics (RDC) and Testillo (TC), showed significant activation potential. After a series of experimental evaluations, optimal activation conditions were established for V-C+P in paste, mortar, and concrete matrices: a activator-to-precursor ratio of 0.30, a 4M NaOH activating solution with 1% sodium silicate by weight, a curing period of 48 hours at 70°C, a minimum average particle size of 0.3 mm or a specific surface area of 54 cm²/g. Prior to obtaining these values, the importance of fineness, dissolution capacity, the real influence of amorphous content, and the limited effectiveness of traditional superplasticizers in AAMs was quantified.

Chemical and mechanical analyses of various pastes made with V-C+P, using different activation concentrations and activator-to-precursor ratios, revealed that the primary reaction products were C-S-H and N-A-S-H, comprising up to 28% of the total mass.

These chemical transformations involved the predominant conversion of Si-O-Si bonds to Si-O-Na, and the presence of a long-term compound contributing to the observed resistance was detected in FT-IR and possibly XRD analyses.

Based on the results obtained, an improved formulation of AAM was defined by adding 10% cement, serving as the basis for prefabricated element analysis. Additionally, an optimized formulation combining ceramic by-products with 30% V-C+P was presented, yielding highly favorable results.

The AAM obtained, through the implementation of suitable industrial scaling and optimized grinding and curing processes, demonstrates significant potential for the production of low-carbon footprint precast building elements. This AAM not only ensures efficient utilization of materials but also reduces cement consumption by 90%. Furthermore, it is demonstrated that even by combining glass precursors with Testillo-type ceramic precursors, an alternative material with high mechanical strength that meets the required fineness criteria set by applicable regulations can be achieved. In conclusion, this research confirms that the AAM obtained from the non-recyclable fraction of glass meets the established technical requirements, despite current regulations restricting its implementation as a sole binder material for precast building elements.

Índice general

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	17
1.1	INTRODUCCIÓN.....	17
1.2	OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL.....	18
1.2.1	Objetivo General.....	18
1.2.2	Objetivos específicos:.....	18
1.2.3	Hipótesis de partida.....	18
1.2.4	Contexto de la tesis doctoral.....	18
1.3	METODOLOGÍA GENERAL.....	19
1.3.1	Técnicas experimentales.....	20
1.3.2	Acondicionamiento de subproductos.....	23
1.3.3	Procedimiento para preparación de muestras para ensayos mecánicos.....	23
1.3.4	Varianza de especímenes.....	25
2	ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	26
2.1	ESCORIAS DE ACERO.....	26
2.2	ESCORIA DE COBRE.....	29
2.3	SUBPRODUCTOS CERÁMICOS.....	31
2.4	CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDO (FCC).....	35
2.5	FRACCIÓN NO RECICLABLE DE VIDRIO.....	37
3	ESTUDIO DE MATERIALES PARA ACTIVACIÓN.....	40
3.1	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	40
3.2	METODOLOGÍA DEL CAPÍTULO.....	41
3.3	ANÁLISIS DE OPORTUNIDAD.....	41
3.3.1	Procedimiento.....	43
3.3.2	Resultados.....	43
3.3.3	Sumario.....	45
3.3.4	Materiales adquiridos para el estudio.....	46
3.4	ANÁLISIS DE APTITUD DE LOS MATERIALES.....	50
3.4.1	Acondicionamiento.....	50
3.4.2	Características físicas.....	52
3.4.3	Características químicas.....	55
3.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3.....	78
3.6	ANEJOS DEL CAPÍTULO 3.....	80
3.6.1	Anejo 1. Resultados FRX.....	80
3.6.2	Anejo 2. Resultados DRX.....	82
3.6.3	Anejo 3. Resultados RMN de acuerdo con GAO 2017.....	84
3.6.4	Anejo 4. Interpretación de resultados RMN.....	85
3.6.5	Anejo 5. Aspecto microscópico de los diferentes materiales estudiados.....	88
4	ACTIVACIÓN ALCALINA DE LOS MATERIALES.....	89
4.1	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	89
4.2	METODOLOGÍA DEL CAPÍTULO.....	90
4.3	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	91
4.3.1	Activación de los precursores.....	91
4.3.2	Caracterización del MAA base (V-C+P).....	114
4.4	OPTIMIZACIÓN DEL MAA BASE (V-C+P).....	131
4.4.1	Temperatura de curado.....	131

4.4.2	Finura.....	135
4.4.3	Incorporación de aditivos.....	137
4.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4.....	143
4.6	ANEJOS CAPÍTULO 4.....	145
4.6.1	Anejo 5. Interpretación espectros FT-IR.....	145
4.6.2	Anejo 6: Presencia halo 10-20 en espectro de DRX en pastas con precursores tipo vidrio 146	
4.6.3	Anejo 7. Datos reológicos complementarios.....	148
4.6.4	Anejo 8. Espectros de RMN y DRX para el C-S-H.....	151
5	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PREFABRICADO.....	152
5.1	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	152
5.2	METODOLOGÍA DEL CAPÍTULO.....	153
5.3	REQUISITOS SEGÚN NORMATIVA.....	154
5.3.1	Requerimientos del material.....	155
5.3.2	Requerimientos de la estructura.....	156
5.3.3	Sumario.....	157
5.4	TRABAJO EXPERIMENTAL.....	157
5.4.1	Adecuación de la superficie específica del precursor.....	157
5.4.2	Fabricación de losa.....	161
5.4.3	Sumario.....	164
5.5	REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES.....	165
5.5.1	Análisis del modulo.....	166
5.5.2	Análisis de la losa.....	171
5.5.3	Alternativas de diseño.....	174
5.5.4	Sumario.....	178
5.6	MAA ALTERNATIVO.....	178
5.6.1	Procedimiento.....	179
5.6.2	Resultados.....	180
5.6.3	Sumario.....	182
5.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5.....	183
5.8	ANEJOS DEL CAPÍTULO 5.....	185
5.8.1	Anejo 9. Métodos de molienda a pequeña escala.....	185
5.8.2	Anejo 10. Cálculo de parámetros de molienda.....	187
5.8.3	Anejo 11. Cálculo de momentos máximos y cortante en la losa prefabricada.....	188
5.8.4	Anejo 12. Imágenes de modelación de alternativas de módulos SAP2000.....	190
5.8.5	Anejo 13.Plano final de modulo.....	205
5.8.6	Anejo 14. Elementos de elevación.....	206
5.8.7	Anejo 15.Anclajes comerciales.....	207
5.8.8	Anejo 16. Anclajes opcionales del módulo.....	208
6	CONCLUSIONES FINALES.....	210
6.1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	212

Índice de figuras

Figura 1. Metodología general del estudio.....	20
Figura 2. Procedimiento general para el acondicionamiento de los subproductos para su activación alcalina.....	23
Figura 3. Procedimiento general para la fabricación de muestras de pastas y morteros.	24
Figura 4. Muestras para comprobación coeficiente de variación en especímenes	25
Figura 5. Metodología general del capítulo 3.....	41
Figura 6. Distribución de potenciales precursores para MAA en España y en el mundo. ...	42
Figura 7. Mapa de residuos disponibles en España. Fuente: Directorio de empresas INFORMA, Empresas del proyecto marco y reportes empresariales [58][47][59].	43
Figura 9. Muestras pulverizadas para análisis químicos.....	57
Figura 10. Composición química de materiales según FRX.....	58
Figura 11. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Vidrio.	62
Figura 12. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Escoria.	63
Figura 13. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Catalizador.	64
Figura 14. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Cerámicos.	65
Figura 15. Comparación entre porcentaje amorfo de los residuos y porcentaje de silicio amorfo.	66
Figura 16. Resultados de RMN para cada uno de los residuos. Porcentaje de Si reactivo (Q0, Q1, Q2 y Q3), y porcentaje de Al reactivo (Al(IV), A(V)). EC-1 no pudo ser medido por el alto contenido de Fe.	68
Figura 17. Deconvoluciones de RMN para vidrios. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al	70
Figura 18. Deconvoluciones de RMN para escorias. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al	71
Figura 19. Deconvoluciones de RMN para catalizadores. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al	73
Figura 20. Deconvoluciones de RMN para cerámicos. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al	74
Figura 21. Deconvolución de ^{29}Si RMN para la muestra V-C+P (presente estudio).	86
Figura 22. Comparación de las interpretaciones de los ^{29}Si RMN para los autores mencionados en la Tabla 25.....	87
Figura 23. Metodología implementada en la el apartado 4.....	90
Figura 24. Imágenes del test de ataque alcalino	92
Figura 25. Si solubilizado como resultado del ataque alcalino con NaOH.....	93
Figura 26. Al solubilizado como resultado del ataque alcalino con NaOH.....	94
Figura 27. Ensayo experimental para determinación de L/S mínimo.....	96
Figura 28. test de estabilidad hidrolítica.....	97
Figura 29. Muestras de Ca y EB sin fraguar.....	98
Figura 30. Muestras para evaluación de resistencia a compresión con variación de la relación L/S.....	100

Figura 31. Resultados de resistencia compresión para diferentes residuos con variación de la relación L/S.....	101
Figura 32. Resultados de resistencia compresión para diferentes residuos con variación del porcentaje de Na ₂ O para muestras de 0.3 L/S. Los %Na ₂ O son con respecto a toda la pasta...	101
Figura 33. Morteros. Dosificación #1 A:P 3:1, b. Dosificación #2 A:P 1:1. A=Arena, P:precursor..	103
Figura 34. Resultados de resistencia compresión morteros con dosificación corregida (#3) relación A/P =0.3.....	105
Figura 35. Resultados de resistencia flexión en morteros con dosificación corregida (#3) relación A/P =0.3.....	105
Figura 36. Muestra de mortero VL-mix D#3. Se observan múltiples fisuras en la superficie relación A/P =0.3.....	106
Figura 37. Hormigones MAA. Muestras para cada material y resultado de ensayo de flujo.....	109
Figura 38. Hormigones elaborados con tamaño de partícula de precursor inferior a 0.12 mm.	110
Figura 39. Resultados a compresión de hormigones elaborados con V-C+P, TC, VL-mix y RDC.	110
Figura 40. Hormigones elaborados con diferente tiempo de curado: 48 h y 96 h.	112
Figura 41. Muestras. a) Pastas para análisis químico. b) Pastas para comportamiento mecánico.	114
Figura 42. Resultados de resistencia mecánica para las pastas V-C+P con variación de la molaridad y la relación L/S.....	115
Figura 43. Cuantificación de la fase cristalina DRX (error ± 1%)	118
Figura 44. Variación de la fase amorfa para las diferentes pastas de V-C+P.....	118
Figura 45. ²⁷ Al MAS NMR deconvolución para las pastas V-C+P con L/S=0,3.....	120
Figura 46. ²⁹ Si MAS NMR deconvolución para para las pastas V-C+P con L/S=0,3.....	121
Figura 47. ²⁹ Si MAS Cuantificación de RMN de especies químicas de Si para las pastas de V-C+P con variación de la molaridad y la relación L/S.....	122
Figura 48. ²⁷ Al MAS Comparación de los posibles compuestos generados para las pastas de V-C+P con variación de la molaridad y la relación L/S.....	123
Figura 49. Estimación del porcentaje de C-S-H según los datos RMN.....	123
Figura 50. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P.....	124
Figura 51. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P. Apliación de banda alrededor de los 1000 cm ⁻¹	125
Figura 52. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P. Apliación de banda alrededor de los 450-1200 cm ⁻¹	125
Figura 53. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P. Apliación de banda alrededor de los 1200-3500 cm ⁻¹	126
Figura 54. Procedimiento de extracción de C-S-H, C-A-S-H y N-A-S-H.....	129
Figura 55. . Resultados de extracción fases de calcio (CSH y/o CASH) en el ataque con ácido salicílico /metanol y extracción de fases reactivas en el ataque acido en pastas de V-C+P.	130

Figura 56. Preparación y muestras finales curadas a diferente temperatura después de 48h.	132
Figura 57. Resultados del efecto de la temperatura de curado en la resistencia mecánica para pastas de V-C+P a los 28 días.	133
Figura 58. Evidencia de fisuras y deformaciones de muestras curadas a 100°C.	133
Figura 59. Resultados del efecto de la temperatura de curado en la resistencia mecánica.	134
Figura 60. Resultados del efecto de la finura en la resistencia mecánica.	136
Figura 61. Fluidez de los morteros expresados en mm.	136
Figura 62. Resultados de ensayos de flujo para morteros con Aditivos As(SP) y Ad(EX).	139
Figura 63. Reducción de la resistencia en morteros con precursor V-C+P y diferente dosificación de Ad(SP) o Ad(EX).	139
Figura 64. Ensayos de flujo para morteros con Ad(SP) y Ad(EX).	141
Figura 65. Comportamiento reológico, comparación de tipo de flujo.	148
Figura 66. Comportamiento Medidas de reómetro, comparación de resistencia al corte t máxima y mínima en el tiempo.	149
Figura 67. Metodología del capítulo 5.	153
Figura 68. Granulometría de muestras de material V-C+P con diferentes métodos de molienda	159
Figura 69. Muestras de precursor V-C+P con diferente finura.	161
Figura 70. Etapas de preparación MAA V-C+P.	163
Figura 71. Muestras de MAA V-C+P.	163
Figura 72. Esquema de modulo inicial de proyecto.	165
Figura 73. Cargas actuantes sobre el módulo.	166
Figura 74. Resortes simulando de la rigidez del suelo.	168
Figura 75. Especificaciones camión de limpieza.	168
Figura 76. a) Cargas de agua y b) de un eje del camión de limpieza en kN.	169
Figura 77. Deformación U3 en m.	170
Figura 78. Esfuerzo Smax en KN/m ² .	170
Figura 79. Esfuerzo Cortante S12 en KN/m ² .	170
Figura 80. Análisis de espesor óptimo para la losa superior del módulo.	173
Figura 81. Diseño 1.	175
Figura 82. Diseño 1.	175
Figura 83. Diseño 2.	176
Figura 84. Diseño 3.	177
Figura 85. Diseño 4.	177
Figura 86. Imágenes de procedimientos probetas combinadas con 30% de V-C+P.	179
Figura 87. Resultados de combinación de residuos.	180

Figura 88. Cambios en el flujo en probetas combinadas con 30% de V-C+P.....	181
Figura 89. Deformaciones (m) diseño 0.....	190
Figura 90. Esfuerzo máximo S_{max} (kN/m^2) diseño 0.....	191
Figura 91. Esfuerzo cortante S_{12} (kN/m^2) diseño 0.....	192
Figura 92. Deformaciones (mm) diseño 1.....	193
Figura 93. Esfuerzo máximo S_{Max} (kN/m^2) diseño 1.....	194
Figura 94. Cortante S_{12} (kN/m^2), diseño 1.....	195
Figura 95. Deformación máxima (mm), diseño 2.....	196
Figura 96. Esfuerzo máximo S_{max} (kN/m^2), diseño 2.....	197
Figura 97. Esfuerzo Cortante S_{12} (kN/m^2), diseño 2.....	198
Figura 98. Deformación máxima (mm), diseño 3.....	199
Figura 99. Esfuerzo máximo (kN/m^2), diseño 3.....	200
Figura 100. Esfuerzo cortante máximo S_{12} (kN/m^2), diseño 3.....	201
Figura 101. Deformación máxima (mm), diseño 4.....	202
Figura 102. Esfuerzo máximo (kN/m^2), diseño 4.....	203
Figura 103. Esfuerzo cortante S_{12} (kN/m^2), diseño 4.....	204
Figura 104. Métodos de colocación de prefabricados tipo losa en obra.....	206

Índice de tablas

Tabla 1. Normas para caracterización mecánica y física de materiales.....	21
Tabla 2. Variación de los resultados de resistencia a compresión con diferentes tipos de especímenes	25
Tabla 3. Estudios previos sobre MAA a partir de residuos de escorias de acero.	28
Tabla 4. Estudios previos sobre MAA a partir de escorias de cobre.	30
Tabla 5. Estudios previos sobre MAA a partir de residuos Cerámicos y Ladrillo cocido.	33
Tabla 6. Estudios previos sobre MAA a partir de FCC.....	36
Tabla 7. Estudios previos sobre MAA a partir de residuos de vidrio.	38
Tabla 8. Residuos identificados en la literatura como precursores para MAA. *fuente: Scopus. **datos de 2 refinерías se espera que la producción sea mayor teniendo en cuenta que existen 7 refinерías identificadas.....	42
Tabla 9. Primer grupo de residuos disponibles para activación alcalina en España.....	44
Tabla 10. Criterios de selección para primer grupo de residuos.	45
Tabla 11. Escoria blanca de acero recibida para la evaluación experimental.....	46
Tabla 12. Escorias de cobre recibidas para la evaluación experimental.....	46
Tabla 13. RDC tipo cerámica y ladrillo rojo recibidos para la evaluación experimental.....	47
Tabla 14. FCC recibido para la evaluación experimental.....	48
Tabla 15. Materiales provenientes de la fabricación o reciclaje de vidrio recibidos para evaluación experimental.....	49
Tabla 16. Residuos adquiridos para análisis de aptitud.....	50
Tabla 17. Elementos removidos del material tipo vidrio con cerámica y papel (V-C+P).....	51
Tabla 18. Ejemplo de acondicionamiento de algunos materiales.	51
Tabla 19. Acondicionamiento aplicado a cada uno de los residuos.....	53
Tabla 20. Caracterización física. *<0.01 no detectable. ** ensayos de informes confidenciales suministrados por la empresa proveedora.....	54
Tabla 22. Residuos recomendados para la fase 2 según FRX.....	60
Tabla 21. Subproductos recomendados para la activación teniendo en cuenta los resultados de la FRX.....	60
Tabla 23. Subproductos recomendados para la activación teniendo en cuenta los resultados de la FRX y DRX.	66
Tabla 23. Resultados resumidos de los porcentajes obtenidos de la RMN.	67
Tabla 24. Características de la estructura química de los materiales.	75
Tabla 23. Subproductos recomendados para la activación teniendo en cuenta los resultados de la FRX, DRX y RMN	77
Tabla 25. Interpretación de datos RMN según Gao et al 2017 [6] y Silva et al 2011 [72].	86
Tabla 26. Concentraciones óptimas para disolución de máxima de Si y Al.....	95

Tabla 27. L/S mínimo y pérdida de masa de las muestras después del ensayo de estabilidad hidrolítica.....	98
Tabla 28. Resultados de estabilidad hidráulica, resistencia y densidad para pastas con dosificaciones óptimas para cada material.	102
Tabla 29. Dosificación de morteros para ensayos mecánicos.....	104
Tabla 30. Resultados ensayos complementarios en morteros dosificaciones # 1 y 2.	104
Tabla 31. Resultados ensayos complementarios en morteros para dosificación #3 (D#3)	106
Tabla 32. Resumen de resultados ensayos en hormigones y tendencias de la resistencia para cada material.....	112
Tabla 33. Muestras para la caracterización química de pastas de V-C+P. Amf= amorfo.....	114
Tabla 34. Extracción de fases.....	130
Tabla 35. Dosificación para muestras para ensayo de evaluación de la temperatura de curado.	132
Tabla 36. Normativa vigente relacionada con prefabricados.....	155
Tabla 37. Muestras iniciales para la determinación del método óptimo de molienda.	158
Tabla 38. Cambios en la granulometría con la aplicación de diferentes tipos de molienda.....	160
Tabla 39. Cambios en el tamaño de partícula la densidad y la absorción en morteros de V-C+P.	161
Tabla 40. Proporciones mezcla para MAA de V-C+P.....	162
Tabla 41. Resultados de caracterización del MAA de V-C+P.....	164
Tabla 42. Cálculo del coeficiente de balasto en la base del módulo.....	167
Tabla 43. Propiedades de los materiales del modelo.....	169
Tabla 44. resumen de resultados de las 4 modelaciones.	171
Tabla 45. Análisis de losa. Simplificación del sistema y resultados.....	172
Tabla 46. Resultados de caracterización del MAA de V-C+P.....	173
Tabla 47. resumen de resultados de los 5 diseños.....	178
Tabla 48. Dosificación de muestras para combinación de precursores.	179

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

El cambio obliga a los gobiernos a implementar materiales de construcción con menor huella de carbono y a la sustitución de sus procesos y materias primas constituyentes [1]. La producción de 1 tonelada de pasta de cemento puede emitir de 0.19 a 0.24 toneladas de dióxido de carbono. Una alternativa al hormigón podría llegar a ser los materiales activados alcalinamente (MAAs). Los MAAs son sistemas aglutinantes con propiedades y apariencia similar a la del hormigón pero que no requieren en su elaboración los elevados consumos energéticos [2]. Por otro lado, estos materiales pueden ser producidos con una reducción entre un 19% y un 48% de costos comparado con el hormigón [3].

En la presente investigación se realizó un análisis teórico y experimental de diferentes subproductos industriales y residuos urbanos en España, con el objetivo de obtener una MAA con características adecuadas para la producción de elementos prefabricados. En el desarrollo de la tesis se definen las proporciones, condiciones de producción y lineamientos de diseño estructural para un prefabricado tipo, que consiste en un módulo tipo cajón que pueda conformar carril para la circulación de bicicletas.

La investigación se dividió en tres fases: Un primer estudio de los precursores disponibles en España y sus características, una segunda etapa en donde se realizaron diferentes campañas experimentales para la optimización y caracterización de los diferentes subproductos hasta obtener un MAA de resistencia superior a 25 MPa. Por último, un análisis estructural del prefabricado tipo.

Muchos autores realizan activación alcalina centrándose en un subproducto y haciendo análisis muy específicos sin considerar las condiciones de implementación. En este sentido, el aporte más significativo de la tesis doctoral es la diferenciación del comportamiento de diferentes subproductos con un análisis enfocado en la obtención de un material industrializable.

Los resultados muestran que existen diferentes subproductos con capacidad estructural y consistencia adecuada para su uso como materiales de construcción, pero cada uno requiere de unas condiciones de activación específicas. Puntualmente el subproducto de vidrio de contenedor se encontró como el precursor para MAA con mayor potencial por sus características químicas y mecánicas.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL

1.2.1 Objetivo General

Establecer una metodología para la activación alcalina de residuos industriales y residuos urbanos, con la definición de las proporciones, condiciones de producción y lineamientos de diseño estructural para un módulo prefabricado que pueda ser implementado como sustrato de vías urbanas recreativas.

1.2.2 Objetivos específicos:

Los objetivos específicos planteados para dar respuesta al objetivo general, son:

- Identificar los criterios de caracterización clave de subproductos para establecer su potencial de activación.
- Caracterizar mediante procedimientos experimentales subproductos de origen urbano e industriales para determinar su potencial como material activado alcalinamente (MAA).
- Determinar mediante procedimientos experimentales y/o modelos las condiciones óptimas de curado, y activación mecánica para los diferentes precursores.
- Establecer mediante procedimientos experimentales y/o modelos los parámetros del activador para los diferentes precursores.
- Caracterizar la resistencia mecánica y la trabajabilidad de los MAA generados.
- Analizar la variabilidad de las reacciones de los AMM optimizados.
- Analizar los parámetros estructurales del prefabricado a escala que permitan la posterior construcción del mismo mediante simulación.

1.2.3 Hipótesis de partida

La tesis doctoral parte de la premisa que:

“Es posible obtener un hormigón para uso en vías de carril bici a partir de residuos industriales y/o urbanos mediante la aplicación de un proceso de activación alcalina”

1.2.4 Contexto de la tesis doctoral

La industrialización de la construcción se ha convertido en una tendencia en alza. Los sistemas prefabricados, que consisten en la fabricación de elementos estructurales en fábricas y su posterior ensamblaje en el lugar de construcción, han ganado popularidad

debido a su capacidad para reducir los tiempos de construcción, minimizar los residuos y optimizar los recursos.

Por otro lado, la activación alcalina de subproductos industriales ha surgido como una alternativa prometedora en la fabricación de materiales constitutivos para piezas prefabricadas. Esta tecnología aprovecha subproductos de la industria, como cenizas volantes, escorias de alto horno y otros residuos, activándolos mediante una combinación de álcalis, lo que les confiere propiedades de resistencia y durabilidad comparables al hormigón convencional.

Al utilizar estos materiales activados alcalinamente, se logra una doble ventaja: por un lado, se reduce significativamente el impacto ambiental asociado con la producción del material; por otro lado, se aprovechan subproductos industriales que de otro modo podrían acabar en vertederos.

El presente trabajo de investigación se desarrolla dentro del proyecto “Carril bici: sostenible, energéticamente autosuficiente, inteligente, descontaminante integrado y seguro” (BICI SENDAS) de programa estratégico Cien: IDI-20181095 en las actividades concernientes al desarrollo de un material activado alcalinamente (AAM).

El trabajo de la tesis doctoral también fue financiado por la convocatoria de “Ajuts per a la contractació de personal investigador perdoctoral en formació (FI) per a l’any 2020-2022”.

1.3 METODOLOGÍA GENERAL

Para la consecución de los objetivos planteados en primer lugar se realizó un estudio preliminar de los materiales disponibles con potencial para ser precursores. Dicho estudio tiene en cuenta la viabilidad técnica del uso como material homólogo al hormigón, así como como la factibilidad de su implementación real en el contexto nacional. En segundo lugar, fue necesaria una etapa experimental iterativa que permitió la optimización y caracterización desde el cementante, hasta una matriz de hormigón, de los residuos escogidos como precursores potenciales. Por último, se llevó a cabo el análisis estructural y la fabricación de piezas a escala real para la validación de su implementación.

Para sistematizar el estudio, la metodología se divide en 3 fases, las cuales se esquematizan en la Figura 1 y se amplían en el desarrollo de cada fase.

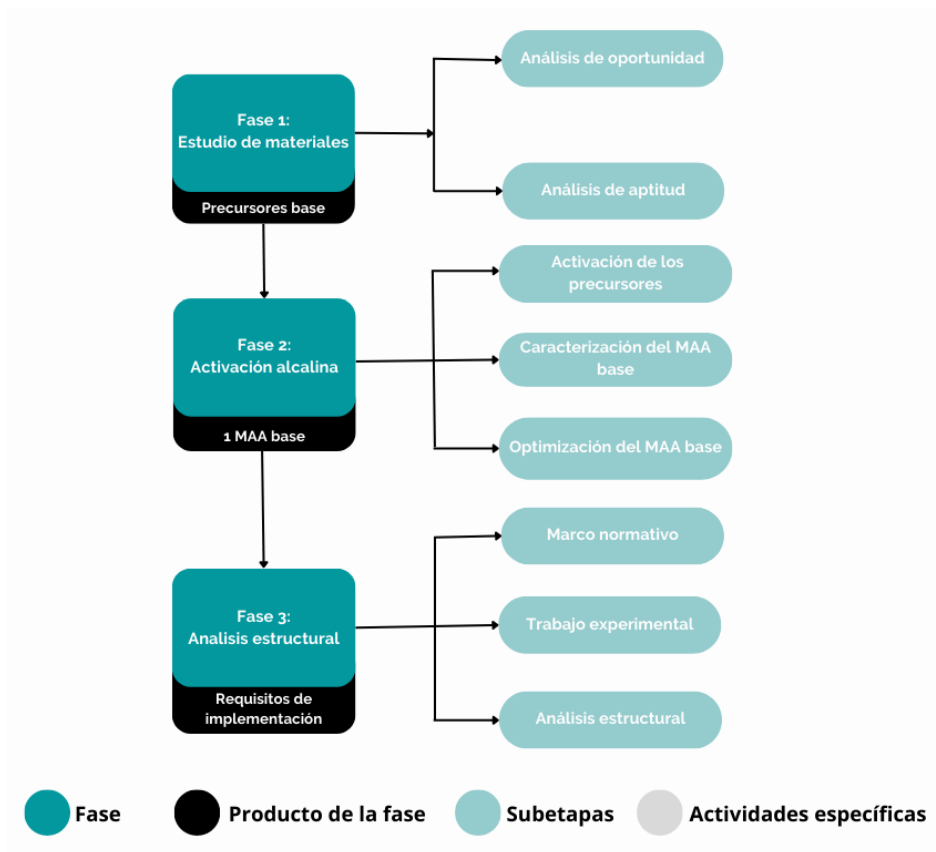


Figura 1. Metodología general del estudio.

Cada sección dentro de las fases tiene como objetivo realizar análisis o experimentos específicos, se describe el procedimiento utilizado y se presentan los resultados de manera extensa y con datos cuantificables. Al final de cada capítulo se encuentran las conclusiones, donde se resumen los hallazgos más importantes mencionados en las secciones anteriores, pero de manera más general para abarcar el objetivo global de la fase.

En los Anejos se incluyen resultados más detallados de los análisis experimentales, procedimientos complementarios, documentos de referencia y otra información adicional que, debido a su especificidad o extensión, podría distraer la lectura del documento.

1.3.1 Técnicas experimentales

A continuación, se presentan los ensayos estándar de caracterización. En el desarrollo de los capítulos se encontrarán en detalle ensayos adicionales más específicos requeridos para cada etapa.

1.3.1.1 Ensayos físicos y mecánicos

Los ensayos de caracterización física y mecánica principales se llevaron a cabo siguiendo las siguientes normas:

Tabla 1. Normas para caracterización mecánica y física de materiales.

Parámetro	Norma/método
<i>Consistencia</i>	UNE 83313:1990
<i>Resistencia a compresión</i>	UNE-EN 12390-3:2020
<i>Resistencia a la flexión</i>	UNE-EN 12390-5:2020
<i>Módulo de elasticidad</i>	UNE-EN 12390-13:2022
<i>Densidad</i>	UNE-EN 1936:2007.
<i>Absorción</i>	

La resistencia a compresión y flexión fueron realizados diferentes edades en una maquina universal, con una velocidad de carga de 2,4 kN/s.

1.3.1.2 Ensayos químicos

I. Fluorescencia de rayos X (FRX)

La FRX permite una primera identificación y cuantificación de los compuestos presentes en las muestras. Para cada residuo en polvo, la composición química de los elementos mayores y menores, las fases mineral y cristalina y la fase amorfa fueron evaluadas.

Las muestras se secaron previamente a 105 °C durante 1 h, y se calcinaron durante 2 h a 950°C. La FRX se llevó a cabo en un equipo secuencial ARL ADVANT'XP+ de la casa THERMO con una magnitud de onda (WDXRFL). Los datos de concentración se obtuvieron a través del Software Integrado UNIQUANT, en forma de óxidos y teniendo en cuenta el porcentaje de LOI.

II. Difracción de rayos X (DRX) con análisis Rietveld

Por medio del DRX es posible determinar los tipos de material cristalino de las muestras y empleando el método Rietveld se pueden determinar los porcentajes de dichas fases cristalinas y por ende el porcentaje amorfo. El porcentaje amorfo se refiere al grado de desorganización de la red de compuestos y en cuanto mayor sea se presume una mayor reactividad.

El DRX se realizó en un difractómetro PANalytical X'Pert PRO MPD con radiación CuK α 1 (1.5406 Å) Las mediciones se realizaron de 5° a 70° (2 θ) durante 2h y 37 min, con un tamaño de paso de 0.0167°. El tubo trabajaba a 45 kV y 40 mA.

Para la cuantificación del porcentaje de fases amorfas se ha aplicado el método de Rietveld mediante el uso de software con el estándar interno. El método Rietveld es hoy en día una herramienta precisa y exacta que permite la medición del contenido de fase amorfa con una precisión cercana al 1% [4].

Los porcentajes del DRX no tienen en cuenta el la perdida por calcinación. La pérdida por ignición (loss on ignition LOI) es una práctica, empleada antes del análisis de muestras inorgánicas para eliminar y medir el contenido de materia orgánica. Consiste en calentar la muestra a temperaturas elevada (en este caso a 950° C) para que las sustancias orgánicas de la muestra escapen, hasta obtener un peso constante. El LOI típicamente consisten en agua (hidratos) y CO₂ de carbonatos. Puede ser utilizado como test de calidad y asegura que la materia orgánica volátil ha sido removida de la muestra.

III. Resonancia magnética nuclear (RMN)

La RMN permite conocer las estructuras y el estado de polimerización de ciertos elementos en muestras inorgánicas. Si los compuestos estudiados tienen enlaces libres, se identifican estructuras específicas no-polimerizadas y éstas pueden estar más propensas a formar nuevos compuestos, lo que sería un indicador indirecto de la reactividad del material. En este caso se empleó RMN para el ²⁹Si y el ²⁷Al con el objetivo de identificar los estados de polimerización del silicio y el aluminio y caracterizar la red.

El análisis de ²⁷Al y ²⁹Si se realizó para cada muestra en un equipo ADVANCEIII HD 600 (Bruker AXS) utilizando la técnica Hpdéc, con una secuencia de desacoplamiento cw. Las mediciones se llevaron a cabo en una sonda DVT de triple resonancia de 2,5 mm y rango de banda ancha dual. Los espectros para el ²⁷Al se realizaron a una velocidad de rotación de 20 kHz y con un pulso de 0,27 -us 90° y 1 -s de retardo de un D1 de 1 s y 5000 barridos. Los espectros para el ²⁹Si se realizaron a una velocidad de rotación de 15 kHz y con un pulso de 90° de 5 us, un D1 de 30 s y 4200 barridos. Para ambos, se entregaron los espectros de deconvolución con los porcentajes y las fases se asignaron de acuerdo con el trabajo [5][21].

IV. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Se utilizó FT-IR para evaluar la estructura química y la composición y se comparó tanto los polvos de pastas iniciales como los disueltos (con diferentes soluciones de NaOH y relaciones L/S) utilizando equipos de espectro dos™ de PerkinElmer.

1.3.2 Acondicionamiento de subproductos

Para la realización de especímenes fue necesario acondicionar los subproductos hasta obtener una homogeneidad y una finura adecuada. El proceso general se ilustra en la Figura 2. Las etapas consistieron en el secado del material durante 24h a 75°C para luego realizar la molienda del mismo. El proceso de molienda varió a lo largo del desarrollo experimental.



Figura 2. Procedimiento general para el acondicionamiento de los subproductos para su activación alcalina.

Para muestras de menos de 2 kg se empleó el molino de anillos y para obtener volúmenes mayores de material se empleó una molienda en la Máquina de los Ángeles. Finalmente, el material fue tamizado hasta obtener el tamaño de partícula específico que también varió a lo largo del desarrollo de la investigación.

1.3.3 Procedimiento para preparación de muestras para ensayos mecánicos

Para la fabricación de las probetas de pastas y morteros se siguió la norma de referencia: UNE-EN 196-1:2018. Entre 3 y 6 especímenes se prepararon para cada prueba mecánica. Los especímenes tuvieron dimensiones diversas dependiendo del tipo de ensayo, pero en la mayoría de los test se fabricaron prismas de 16*4*4 cm y cubos de 2,5x2,5x2,5 cm³. En la Figura 3 se encuentran imágenes de las diferentes etapas de fabricación.



Figura 3. Procedimiento general para la fabricación de muestras de pastas y morteros.

En el Anejo 1 de la fase 2 se encuentra un análisis de la desviación de los resultados según la geometría de muestras. A continuación, se describe el procedimiento general para la fabricación de las probetas.

1. Mezclado:

- I. Precursor + el activador: 30 s.
- II. Precursor + el agua: 30 s, velocidad lenta.
- III. Agregar la arena 30s.
- IV. precursor + activador + arena: 30 s en velocidad lenta.
- V. Despegar manualmente para evitar partes secas en el fondo: 30 s.
- VI. vidrio + activador + arena: 60 s velocidad rápida.

2. Ensayo: Mesa de flujo descrito en la norma UNE-EN 1015-3.

3. Llenado de moldes.

4. Compactación: 60 golpes en mesa compactadora.

5. Sellar con papel plástico y papel aluminio.

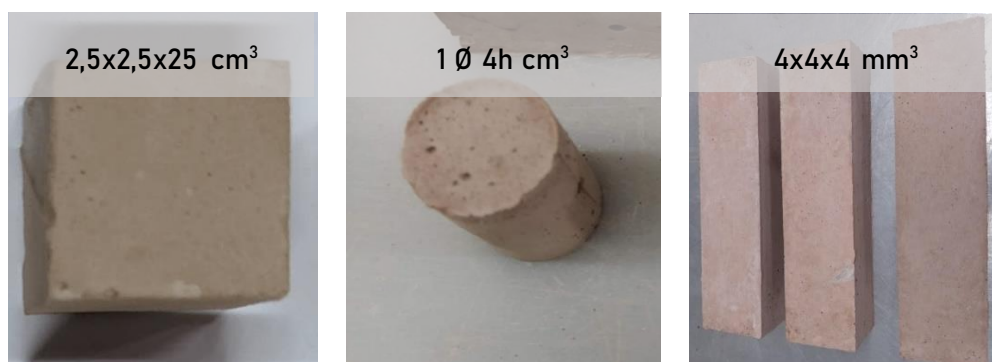
6. Ingresar en horno a 75°C durante 48h.

7. Al pasar las 48h se cubren las probetas con papel film y se ingresan a la cámara de curado seca HR 50%.

1.3.4 Varianza de especímenes

Al inicio de los ensayos se estipuló la realización de especímenes cilíndricos de 1 cm de diámetro y 4 cm de altura, sin embargo, con el primer grupo de muestras se encontraron errores promedio de 23%.

Figura 4. Muestras para comprobación coeficiente de variación en especímenes .



Para evitar obtener resultados poco confiables y con el objetivo de emplear la menor cantidad de material precursor en la primera etapa de los experimentos de evaluación mecánica de pastas, se realizaron tres tipos de especímenes (cúbicos $2,5 \times 2,5 \times 25 \text{ cm}^3$, cilíndricos $1 \text{ } \varnothing \text{ } 4h \text{ cm}^3$, y prismáticos $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) para determinar es coeficiente de variación (CV). Seis especímenes con L/S 0,3 y solución 5,5 M fueron preparados para cada uno de los materiales y para cada tipo de muestra. En la Tabla 3 se encuentran los resultados promedio para cada material, para cada tipo de muestra y el promedio general.

Los resultados muestran que los especímenes con mayor coeficiente de variación fueron los de las muestras cilíndricas. Se escogieron los especímenes de $2,5 \times 2,5 \times 2,5 \text{ cm}^3$ para la evaluación de las pastas debido a que presentan una variación de la Resistencia a compresión (R_c) por debajo del 10% y requieren menor uso de material.

Tabla 2. Variación de los resultados de resistencia a compresión con diferentes tipos de especímenes

Muestras (L/S=0,3)	CV de R_c (%)		
	Cilíndricas $1 \varnothing \times 4h$ (cm)	Cúbica $2,5 \times 2,5 \times 2,5 \text{ cm}^3$	Cúbica $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$
<i>V-C+P</i>	12,30	6,80	3,00
<i>VL-mix</i>	13,20	9,50	4,70
<i>TC</i>	11,10	6,03	3,70
<i>RDC</i>	16,90	9,72	5,20
<i>Promedio</i>	<i>13,38</i>	<i>8,26</i>	<i>4,15</i>

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

A continuación, se presenta el análisis de las características y condiciones experimentales recomendadas, según investigaciones previas. Debido a la gran cantidad de precursores existentes en la literatura el grupo de materiales es escogido para la revisión del estado del arte se centra en los subproductos del análisis llevado a cabo para los residuos preseleccionados en el apartado 3.

2.1 ESCORIAS DE ACERO

Las escorias de acero se distinguen por su método de generación. El acero al carbono puede ser producido mediante un horno de oxígeno básico (HOB) o un horno de arco eléctrico (HAE), y posteriormente refinado en un horno de cuchara (HC) para obtener un acero de mejor calidad. En cuanto al acero inoxidable, puede ser producido en un HAE, HC o mediante un proceso de descarburación-oxígeno con argón. Durante la fabricación de aceros al carbono e inoxidables, se genera una cantidad significativa de escoria de acero como subproducto, representando aproximadamente el 15-20% del peso total de la producción de acero.

Las composiciones de las escorias de acero generadas son altamente variables y se pueden clasificar principalmente en escoria HOB, escoria HAE y escoria HC. La escoria HOB es más alcalina y reactiva que las escorias HAE y HC, y puede ser utilizada como material cementante suplementario en una proporción de sustitución del 10%-20% en peso. Sin embargo, se debe prestar especial atención a la posible inestabilidad volumétrica asociada con la presencia de un alto contenido de CaO. La escoria HAE presenta características similares a la escoria HOB, pero se recomienda su uso como agregado en lugar de reemplazar al cemento en el concreto. Por otro lado, la escoria proveniente del HC generalmente se presenta en forma de polvo y se considera un material no hidráulico [7].

Es importante realizar ensayos a largo plazo con la escoria blanca, ya que puede presentar una disminución de su resistencia [8].

Los diferentes estudios que han llevado a cabo la activación alcalina de escorias provenientes de diversas fuentes se encuentran resumidos en la [Tabla 3](#) donde se destacan las variables del proceso de activación obtenidas de la revisión. A continuación, se sintetizan los aspectos más relevantes para la activación de las escorias de acero:

1. Los estudios experimentales han evidenciado resistencias entre 8-10 MPa al utilizarse en porcentajes de sustitución del 100%. Sin embargo, en el estudio de Gijbels et al. (2019), utilizando un tamaño de partícula de 8 μm , se lograron hormigones de alta resistencia.
2. El activador empleado principalmente es NaOH sin wáter glass (silicato de sodio "WG" por sus siglas en inglés), en concentraciones bajas (0.2 M en varias ocasiones).
3. Las relaciones L/S o equivalentes son muy variables, oscilando entre 0.35-0.82.
4. El curado térmico se realiza en un rango de temperatura entre 20 y 50 °C.
5. Los tamaños de partícula están comprendidos entre 3-150 μm .
6. Se emplea una humedad relativa alta (90-99%).

Tabla 3. Estudios previos sobre MAA a partir de residuos de escorias de acero.

Autor	Ref	Origen	Activador	Concentración o proporción	Radios	Matriz	Sustitución (%)	Temperatura de curado (°C; días)	HR (%)	Tamaño de partícula (μm)	f _c (MPa; días)	Fase Amorfa (%)
<i>Wang et al. 2016</i>	[9]	Walsin Lihwa	NaOH	NaOH 10M SiO ₂ /Na ₂ O=1	L/S =0,35	Pasta	100	25; 28	100 en agua de cal	34	8;28	-
<i>Bignozzi et al. 2013</i>	[10]	Acería de Rubiera SpA, Casalgrande, RE, Italy. De la cuchara del horno de arco eléctrico durante el proceso de refinado.	NaOH+WG	WG: SiO ₂ /Na ₂ O = 1,99 NaOH=8M	L/S =0,82	Pasta	100	20;7	90;24h 55;6 días	90	10;7	-
<i>López González et al 2019</i>	[11]	Proveniente del horno de oxígeno básico. La escoria fue modificada agregando 13% de alúmina.	NaOH	0,25 M	l/b=0,4	Pasta	91 4 yeso 5 CEM	-	-	-	22.5; 28	55
<i>Wang & Suraneni 2019</i>	[12]	Escoria de acero de alto horno granulada y molida.	NaOH+ KOH+ Ca(OH) ₂	NaOH = 0,2 M KOH = 0,6 M Ca(OH) ₂ =0,03 M	A/C=0,4	Pasta	20	50;7	95; 1	-	46; 28 70;90	-
<i>Lu et al. 2018</i>	[13]	Proveniente del horno de oxígeno básico.	NaOH+WG	Na ₂ O=4 SiO ₂ /Na ₂ O =1	c:a 1:2,35	Mortero	20	(-);24h	-	150	22,7;28	-
<i>Zhang et al 2011</i>	[14]	Proveniente del horno de oxígeno básico.	NaOH	NaOH= 0,2 M	A/C : c : af 0,5 : 1 : 3	Mortero	60	20	90 ;24h	1,43	51;28 58;90	-
<i>Gijbels et. Al 2019</i>	[15]	Escoria de acero de alto horno granulada y molida proveniente de una acería en Bélgica.	NaOH+WG	SiO ₂ /Na ₂ O = 0,75 H ₂ O/Na ₂ O=20	sa/p= 0,6	Pasta	100*	20	-	3	78,9	7,6

L/S= liquido/solido; A= agua; C=cementante; af=agregado fino; sa/p=solución alcalina/precursor. HR=humedad relativa, f_c = Resistencia a la compresión.

2.2 ESCORIA DE COBRE

La escoria de cobre se obtiene durante los procesos de fundición, conversión y mezclado [16]. Su producción anual a nivel mundial alcanza aproximadamente 37,7 millones de toneladas, mientras que en España se sitúa alrededor de 0,18 millones de toneladas. En cuanto a su dinámica de activación, se ha observado que la resistencia a la compresión aumenta con el tiempo de curado, siendo posible alcanzar la mayor parte de dicha resistencia en tan solo 3 días. Incluso al aplicar altas temperaturas de curado, se puede lograr hasta un 80% de la resistencia a los 28 días en solo 3 días [17]. La adición de escoria de cobre con bajo contenido de calcio mejora de manera significativa tanto la resistencia a compresión como la microestructura de los MAAs. Esta mejora se atribuye a la alta solubilidad de la sílice presente en la escoria y al tamaño de partícula fino [18].

Según investigaciones previas, la escoria de cobre no se considera peligrosa y las concentraciones de elementos lixiviados se encuentran por debajo de los límites reglamentarios establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) [16]. Sin embargo, es importante destacar que la escoria de cobre contiene una cantidad significativa de Fe_2O_3 , lo cual genera incertidumbre en cuanto al desarrollo de MAA [17].

En la Tabla 4 se recopilan diferentes estudios que han llevado a cabo la activación alcalina de escorias de cobre de diferentes orígenes. A continuación, se enumeran las características del proceso de activación extraídas de la Tabla 4:

1. Se utiliza en porcentajes de sustitución del cemento que oscilan entre el 25% y el 100%.
2. El activador más empleado es NaOH (5-15M), con fracciones de WG y, en algunas ocasiones, se mezcla con metacaolín.
3. Las relaciones L/S o equivalentes se encuentran entre 0,25 y 0,3.
4. Cuando se utiliza como cementante único (100% de sustitución), se requieren temperaturas de curado superiores a 75 °C durante un período mínimo de 24 horas.
5. Los tamaños de partícula comúnmente empleados se sitúan por debajo de los 45 μm .

Tabla 4. Estudios previos sobre MAA a partir de escorias de cobre.

Autor	Ref	Origen	Activador	Concentración o proporción	Radios	Matriz	Sustitución (%)	Temperatura de curado (°C; días)	HR (%; días)	Tamaño de partícula (μm)	f_c (MPa; días)	Fase Amorfa (%)
<i>Nazer et al 2016(1) paste</i>	[19]	Escorias Chilena 1 (Playa negra Atacama) de fundición de cobre de vertedero del siglo XIX	NaOH	5 M	A/100g P= 0,25 SiO ₂ /Na ₂ O=1,45	Pasta	25	20;90	95	15	9;28 40;90	-
<i>Nazer et al 2016(2)</i>		Escorias Chilena 2 (Playa negra Atacama) de fundición de cobre de vertedero del siglo XIX	NaOH	5M	A/100g P= 0,25 SiO ₂ /Na ₂ O=1,45	Pasta	25	20;90	95	15	44;28 64;90	-
<i>Ahmari et al. (2015)</i>	[18]	Escorias de fundición de cobre de Asarco's Hayden Arizona. Proceso de molienda.	NaOH+WG	15 M	Na/Si= 0,3	Pasta	100	75	-	17,7	75;7	-
<i>Kalinkin et al. (2012)</i>	[20]	Escorias de cobre y níquel de Pechenganickel en Murmansk Rusia, enfriadas con agua y molidas en atmosfera de CO ₂ .	NaOH+WG +níquel	SiO ₂ /Na ₂ O =1,5 Na ₂ O = 0.03	0,19-0,23	Pasta	100	20;28 con CO ₂	95	1,25	94,4	-
<i>Singh & Singh 2019 (1)</i>	[17]	Escorias de cobre de Rajasthan, India.	NaOH+WG+ metacaolín	NaOH +WG =7% Si ₂ O/ Na ₂ O = 1,25	0,3	Mortero	100	80; 1 25;27	50	45	33,5	-
<i>Singh & Singh 2019 (2)</i>		Escorias de cobre de Rajasthan, India.	NaOH+WG+ metacaolín	solución NaOH+WG =7% Si ₂ O/ Na ₂ O = 1,25	0,3	Mortero	70	80; 24h 25;27	50	45	45	-

L/S= liquido/solido; A= agua; C=cementante; P=precursor; af=agregado fino; sa=solución alcalina; WG= waterglass; A/Cat = Agua/ catalizador; af/Cat = Agregado fino/ catalizador; HR=humedad relativa, f_c = Resistencia a la compresión.

1. Los valores de resistencia, cuando se aplica una sustitución del 100%, varían entre 33 y 94,4 MPa para morteros y pastas.

2.3 SUBPRODUCTOS CERÁMICOS

Los residuos de ladrillos de arcilla roja y los residuos cerámicos provenientes de azulejos son un grupo de residuos de construcción y demolición, así como de fábrica, que han despertado interés investigativo en la producción de MAAs. Los residuos de ladrillos, principalmente de paredes demolidas, representan aproximadamente el 54% en peso de los residuos de construcción y demolición en España [21]. El volumen de este tipo de residuos es considerable, alcanzando alrededor de 8,87 millones de toneladas al año en España y casi 1000 millones de toneladas a nivel mundial.

Dentro de los residuos de construcción y demolición, se ha observado que los residuos de ladrillo rojo presentan una estructura semi-cristalina [22] Además, los residuos de demolición de concreto muestran una menor resistencia a la compresión en comparación con los residuos de azulejos y ladrillos, que presentan un mejor comportamiento mecánico [23][22]. Los residuos de ladrillos de arcilla roja se originan principalmente de demolición de construcciones. Este tipo de material contiene altos niveles de SiO_2 y Al_2O_3 , los cuales son esenciales para la activación alcalina, junto con cantidades moderadas de CaO y MgO . El contenido de fase amorfa es bajo, alrededor del 35%. Aunque inicialmente pueden generarse estructuras zeolíticas, estas tienden a desaparecer a medida que aumenta la concentración de la solución alcalina. Las propiedades mecánicas de este tipo de MAA generalmente mejoran con el tiempo y la temperatura de curado [21].

Komnitsas et al., 2015 [23] y Robayo et al., 2016 [22] demostraron la importancia de adoptar una concentración adecuada de NaOH al emplear residuos de ladrillos como precursor. Una concentración de NaOH fuera del rango óptimo de 5M-8M podría resultar en una reducción de la resistencia a compresión. Una posible explicación para esto es que una baja concentración de NaOH proporciona una cantidad insuficiente de iones de Na para equilibrar la carga en el sistema del material, mientras que un exceso de NaOH puede causar carbonatación, lo que conduce a una disminución de la reactividad del NaOH [24].

De las investigaciones revisadas en la Tabla 5 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Los cerámicos estudiados presentan resistencias bajas (<20 MPa) al ser utilizados en porcentajes de sustitución del 100%.

2. El activador empleado es NaOH (6M-8M) y NaOH combinado con WG.
3. Las relaciones L/S o equivalentes son muy variables, oscilando entre 0,25 y 0,55.
4. El período de curado térmico de estos materiales es más prolongado en comparación con los anteriores, llegando hasta 7 e incluso 28 días, y las temperaturas pueden alcanzar los 90°C.
5. Los tamaños de partícula se encuentran en el rango de 20-140 μm .
6. Se emplea una alta humedad (80 y 99%).

Tabla 5. Estudios previos sobre MAA a partir de residuos Cerámicos y Ladrillo cocido.

Autor	Ref	Origen	Activador	Concentración o proporción	Ratios	Matriz	Sustitución (%)	Temperatura de curado (°C; días)	HR (%)	Tamaño de partícula (μm)	ƒ _c (MPa; días)	Fase Amorfa (%)
<i>Puertas et al 2006</i>	[25]	Fábrica de baldosas Castellón España	WG	-	L/S=0,5	Pasta	100	85;1	1er periodo: 99;1 2do periodo: 21; 7	-	13;8	13,5
		Fábrica de baldosas Castellón España	NaOH	NaOH 6M	L/S = 0,4	Pasta	100	85;1	1er periodo: 99;1 2do periodo: 21; 7	-	12;8	13,5
<i>Reig et al. 2013</i>	[21]	Residuo de ladrillo de construcción y demolición en España.	NaOH+WG	NaOH 7 M SiO ₂ /Na ₂ O WG SiO ₂ = 28% Na ₂ O = 8% H ₂ O = 64%	A/P=0,4 5 Na=6% SiO ₂ /Na ₂ O =1,60	Mortero	100	65; 7	90;7	20,9	50;7	35
<i>Robayo et al 2016</i>	[22]	Residuo de ladrillo debido a la fracturación de una fábrica en Cali,	NaOH+WG	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 6,60 Na ₂ O/SiO ₂ = 0.12	L/S=0,25	Pastas	80	25;28	80	24,25	102.3;28	-
			NaOH+WG	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ =7,10 Na ₂ O/SiO ₂ =0,12	L/S=0,26	Pasta	100	70;1	80	24,25	66.56;28	-

		Colombia. Molido por molino de bolas.	NaOH	Na ₂ O = 8%	L/S= 0,27	Pasta	100	70;2	80	24,25	16.36;28	-
<i>Fort et al 2018</i>	[26]	Polvo de ladrillo generado durante el proceso de tamizado. Material secado a 105°C por 48 horas.	NaOH+WG	WG =70g Ladrillo = 200 g NaOH = 2,57g Agua =41 ml SiO ₂ /Na ₂ O =1.6	L/S=0,55 5	Pasta	100	20; 28	50;28	61	48.9;28	27,8
<i>Komnitsas 2015</i>	[23]	Azulejos recolectados de demoliciones. Sometidos a limpieza, secado y pulverización.	NaOH	NaOH = 8M Na ₂ O = 6%	L/S= 0,38	Pasta	100	90;7	-	<140 d50 6,6	49.5;7	-
		Azulejos recolectados de demoliciones. Sometidos a limpieza, secado y pulverización.	NaOH	NaOH = 10M Na ₂ O = 6%	L/S=0,40	Pasta	100	80;7	-	<140 d50 14	57.8;7	-

L/S= liquido/solido; A= agua; C=cementante; P=precursor. HR=humedad relativa, f_c = Resistencia a la compresión.

2.4 CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDO (FCC)

Una amplia gama de zeolitas y tamices moleculares se utilizan comúnmente en el proceso de catálisis para la transformación del petróleo crudo en gasolina mediante el craqueo catalítico fluido (FCC). Sin embargo, a largo plazo, no es posible su reutilización continua [27]. A nivel mundial, hay pocos datos concretos sobre la generación de FCC, pero se estima que su producción se sitúa entre 0,16 y 0,40 millones de toneladas al año, y en el caso de España, se producen alrededor de 0,0005 millones de toneladas al año en Huelva y Castellón no aprovechadas.

Las partículas de FCC son porosas y adquieren una forma irregular cuando se muelen. Ambos factores pueden tener una fuerte influencia en la trabajabilidad de las pastas. Por lo tanto, la cantidad de agua requerida para obtener una consistencia normal en las pastas que contienen FCC es mayor que en las pastas con cemento convencional [28]. Experimentos previos sugieren que el FCC tiene un mejor rendimiento cuando se activa con soluciones de silicato en lugar de soluciones de NaOH, y para su curado, es más beneficioso un tratamiento térmico de corta duración [29]. Estudios previos han demostrado que un punto óptimo para lograr resistencias superiores a 80 MPa se alcanza utilizando una relación agua/FCC de 0,45 [30].

Las concentraciones iniciales de metales pesados en el FCC son significativas, destacando los altos niveles de Ni, V y La. Sin embargo, una vez que estos residuos se activan alcalinamente y avanza el proceso de geopolimerización, se produce un proceso de encapsulación e inmovilización fisicoquímica en el FCC activado, donde la mayoría de los contaminantes (Pb, Cr, Zn, Cd, Ba y Sr) se estabilizan [31].

En la Tabla 6 se encuentran diferentes estudios donde se realiza la activación alcalina de FCC proveniente de diversas fuentes. A continuación, se enumeran las características del proceso de activación que se pueden extraer de la revisión resumida en la Tabla 6:

1. El FCC se utiliza en general como sustituto completo del cemento.
2. El activador más utilizado es NaOH+WG (5-10M).
3. Las relaciones L/S o equivalentes varían entre 0,45 y 0,6.
4. Las temperaturas de curado varían entre 25 y 65 °C.
5. Los tamaños de partícula comúnmente empleados están por debajo de 17 µm.
6. Los valores de resistencia varían entre 66 y 84,6 MPa para morteros.

Tabla 6. Estudios previos sobre MAA a partir de FCC.

Autor	Ref	Origen	Activador	concentración o proporción	Radios	Matriz	Sustitución (%)	Temperatura de curado (°C; días)	HR (%)	Tamaño de partícula (μm)	f_c (MPa; días)	Fase Amorfa (%)
<i>Tashima et al. 2012</i>	[29]	Residuo de industria petrolera.	NaOH+WG	10 mol Na/ kg WG:28% SiO ₂ ; 8% Na ₂ O; 64% H ₂ O SiO ₂ /NaOH=1,17	A/P = 0,6	Mortero	100	65;3	100	17,1	68	68
		Residuo de industria petrolera.	NaOH+WG	10 mol Na/kg WG:28% SiO ₂ ; 8% Na ₂ O; 64% H ₂ O SiO ₂ /NaOH=1,17	A/P = 0,45 af/P = 3	Mortero	100	65;3	95	17	83,6	83,6
<i>Mas et. al. 2016</i>	[32]	Residuo de industria petrolera. OMNYA CLARIANA S.A.	NaOH+WG	Na ₂ O/SiO ₂ =1,71 Na=10 mol/kg	A/Cat= 0,46	Mortero	100	20;28	95	17	66;28	66,28
<i>Rodríguez et al 2013</i>	[27]	Residuo de industria petrolera. Refinería BP-Oil España S.A. Castellón (España). Con molienda mecánica de 20 min.	WG	7 %, 10 % and 15 % de Na ₂ O, con respecto a la masa del catalizador.	A/P =0,50	Pasta	100	40;28	-	17,1	-	-
<i>Costa et al 2014</i>	[33]	Residuo de industria petrolera. Refinería portuguesa PETROGAL.	NaOH + CA(OH) ₂	NaOH =5M 20%=CA(OH) ₂	NaOH 5M, sa/C/af 1/1/2,5	Mortero	80	55;28	95	80	14; 28	7,5
<i>Trochez et al 2015</i>	[34]	Refinería Colombiana. Catalizador gastado.	WG	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 2,4 Na ₂ O/SiO ₂ =0,25	-	Pasta	100	25;7	90	16,8	67;7	-

L/S= liquido/solido; A= agua; C=cementante; P=precursor; af=agregado fino; sa=solución alcalina; WG= waterglass; A/Cat = Agua/ catalizador ; af/Cat = Agregado fino/ catalizador; HR=humedad relativa, f_c = Resistencia a la compresión.

7. Se emplea una alta humedad relativa en el proceso de curado (95-100%).

2.5 FRACCIÓN NO RECICLABLE DE VIDRIO

El vidrio de botellas de contenedor es altamente amorfo ($\sim 70\%$) y con tamaños de partícula inferiores a $75\ \mu\text{m}$ demuestra una alta reactividad y puede usarse como materia prima para MAA, desempeñando un papel potencial en la producción de materiales aglutinantes sin cemento [35].

En cuanto a los residuos urbanos, el potencial del vidrio es uno de los más destacados debido a su volumen y efectividad [36][37][3][38]. En España, ha habido un crecimiento significativo en la recolección de vidrio. En 2019, la tasa de reciclaje en España alcanzó el 79,8%, pero aún existen 0,84 millones de toneladas al año que necesitan ser revalorizadas.

Las condiciones de curado, y más específicamente, la humedad relativa, tienen un efecto significativo en el desarrollo de la resistencia en las pastas de vidrio activadas alcalinamente. La resistencia puede variar entre el 50% y el 75%, dependiendo de las condiciones de curado [47]. La sílice amorfa en el vidrio se disuelve bajo ataque alcalino para formar un gel de reacción álcali-sílice (RAS). Sin embargo, el polvo de vidrio finamente molido como material de cemento suplementario evita la expansión por RAS y eventualmente muestra cierto efecto de mitigación en la expansión del RAS [39]. El vidrio también presenta una alta resistencia al ataque ácido [40].

Las investigaciones con ensayos experimentales de activación alcalina de vidrio se resumen en la Tabla 7.

A continuación, se presentan los aspectos comunes encontrados en las investigaciones:

1. Las investigaciones experimentales muestran resistencias entre 26 y 54 MPa al utilizar porcentajes de sustitución del 100%.
2. El activador utilizado principalmente es NaOH sin WG y en concentraciones entre 4 M y 10 M.
3. Las relaciones L/S o equivalentes se encuentran entre 0,23 y 0,5.
4. El curado térmico se sitúa entre 70 y 85 °C. Sin embargo, con un tamaño de partícula de $5\ \mu\text{m}$, es posible realizar un curado a temperatura ambiente.
5. Los tamaños de partícula generalmente se encuentran entre 15 y $46\ \mu\text{m}$.
6. Los mejores resultados de resistencia se han obtenido con un ambiente de curado seco (6,5%).

Tabla 7. Estudios previos sobre MAA a partir de residuos de vidrio.

Autor	Ref.	Origen	Activador	Concentración o proporción	Radios	Matriz	Sustitución (%)	Temperatura de curado (°C ; días)	HR (%; días)	Tamaño de partícula (µm)	f_c (MPa; días)	Fase Amorfa (%)
<i>Rivera et al. 2018</i>	[36]	Vidrio de botellas recicladas	NaOH	6M	L/S = 0,23	Pasta	100	(-);1 70;1 (-);26	90;28	43	54; 28	-
		Residuos de vidrio de ventanas	NaOH	8M	L/S = 0,26	Pasta	100	(-);1 70;1 (-);26	90;28	15,42	32;28	-
		Vidrio de lámparas fluorescentes	NaOH	4M	L/S = 0,26	Pasta	100	(-);1 70;1 (-);26	90;28	19,79	26;28	-
<i>Torres-Carrasco & Puertas 2017 (1)</i>	[37]	vidrio de botellas recicladas Ajalvir, Madrid	NaOH+WG	15g V/ 100 ml 10M NaOH	L/S=0,4 Na ₂ O=9,75% SiO ₂ /Na ₂ O=0,11	Pasta	100	85;1	6,5;1	45	89;1	-
<i>Torres-Carrasco & Puertas 2018 (2)</i>		vidrio multicolores de botellas recicladas Ajalvir, Madrid	KOH	10M	L/S=0,5	Pasta	100*	85; 24h	99; 24h	<46	49*	
<i>Zhang et al 2017</i>	[41]	Polvo de vidrio del proceso de reciclaje de Van Gansewinkel Maltha, Países bajos. Con escoria de acero y ceniza volante.	NaOH	4M	L/S=0,42	Paste	30	20;28	98	5,07	35;28	81.86

Según los estudios previos, las características de activación de los diferentes residuos son variables. Sin embargo, existen dos condiciones comunes necesarias para la activación: una finura inferior a 150 μm y una cámara de curado térmico con capacidad de hasta 80°C. Estas condiciones no representan dificultades relacionadas con la adquisición de materiales especiales o técnicas complejas para llevar a cabo los ensayos en el laboratorio a pequeña escala

3 ESTUDIO DE MATERIALES PARA ACTIVACIÓN

3.1 RESUMEN DEL CAPÍTULO

La generación de subproductos constituye un asunto de gran relevancia en la actualidad, dada la acumulación de estos y la contaminación por ocupación y lixiviación, lo cual plantea un desafío ambiental. Por esta razón, la reutilización de residuos no solo constituye una práctica ambiental, sino que también da lugar a nuevos modelos de negocio con avances tecnológicos que contribuyen al crecimiento económico de las regiones.

En el presente estudio, se examina la viabilidad tecnológica del empleo de subproductos generados en España como precursores de materiales activados alcalinamente. Para identificar los materiales iniciales, se analizan diversos subproductos generados en España que, según la literatura, podrían desempeñar el papel de precursores para MAAs. Tras obtener este listado, se evalúan sus volúmenes de generación, su acondicionamiento, sus propiedades químicas y las condiciones de activación.

Los resultados revelan que España dispone de cinco subproductos con un potencial significativo para precursores de MAA: escorias de acero, residuos de vidrio, residuos de catalizador de craqueo catalítico y diversos cerámicos. Sin embargo, los subproductos considerados como los más viables para su utilización, debido a sus volúmenes, su acondicionamiento y sus características tecnológicas, son las escorias de acero, los residuos de vidrio de contenedor (fracción no reciclable) y los RDCs cerámicos. Estos subproductos exhiben respectivamente propiedades típicas de precursores con alto contenido de calcio, bajo contenido de calcio e híbridos y presentan un elevado contenido de material amorfo.

Estos materiales pueden emplearse para la construcción de elementos prefabricados. En consecuencia, se establece que en España se encuentra un potencial diverso de precursores para la producción de MAA, lo cual podría fortalecer el crecimiento de la construcción industrializada de manera más sostenible.

3.2 METODOLOGÍA DEL CAPÍTULO

Existen numerosos residuos que han sido utilizados en activaciones alcalinas, por lo tanto, resulta imprescindible llevar a cabo un estudio minucioso para seleccionar los materiales más apropiados a nivel nacional. En esta fase inicial, se realiza una evaluación exhaustiva de distintos materiales disponibles en España que cumplan con las propiedades y condiciones técnicas para su empleo como precursores de un MAA.

Esta etapa comprende dos análisis. En primer lugar, se lleva a cabo un análisis de oportunidad con el fin último de seleccionar un grupo de materiales, teniendo en cuenta su interés investigativo a nivel nacional, la seguridad ocupacional, el volumen de disponibilidad en el territorio nacional y la viabilidad de las condiciones de activación. En segundo lugar, se realiza un análisis de aptitud de los materiales preseleccionados, mediante la caracterización básica de las variables físicas y químicas que evidencien una mayor reactividad.

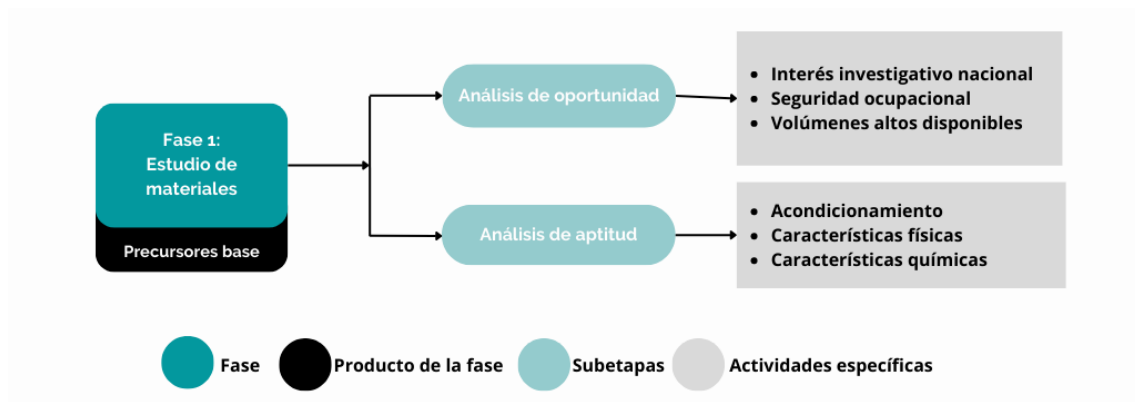


Figura 5. Metodología general del capítulo 3.

Una vez completada esta etapa, se obtiene la caracterización de los subproductos y se establece un primer grupo de materiales con potencial para la activación alcalina.

3.3 ANÁLISIS DE OPORTUNIDAD

Tras llevar a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica, se han identificado nueve tipos de residuos utilizados en la activación alcalina: Escoria de Zinc, Escoria de níquel, Escoria de cobre, Escoria de acero, Escoria de plomo, catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC), Lodo rojo de bauxita, Residuos de vidrio y RDCs en vertedero.

En la Tabla 8 se muestra una clasificación preliminar de los residuos industriales y urbanos, así como sus volúmenes de generación.

Tipo	Precursor	Publicaciones (2021)*	Publicaciones en España (2021)*	Generación anual Mundial (Mt/año)	Generación anual España (Mt/año)
Industriales	Escoria de Zinc	20	0	0,98[42]	0,090 [43]
	Escoria de níquel	24	1	4,00 [44]	0[43]
	Escoria de cobre	23	2	37,7[45]	0,183[43]
	Escoria de acero	27	13	200,00 [12]	2,56[46][47]
	Escoria de plomo	27	6	5,5[48]	0,011[43]
	Residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC).	50	5	0,2-0,4[49]	0,0005[50][51]**
	Lodo rojo de bauxita	141	0	209,00 [52]	0,409 [52][53]
Urbanos	Residuos de vidrio	75	16	97,5 [54]	0,84[55]
	RDCs en vertedero	8	0	916,84[56]	8,87[57]

Tabla 8. Residuos identificados en la literatura como precursores para MAA. *fuente: Scopus. **datos de 2 refinerías se espera que la producción sea mayor teniendo en cuenta que existen 7 refinerías identificadas.

El número de publicaciones refleja que, desde una perspectiva académica global, existe un amplio interés investigativo en la reutilización de cada uno de estos materiales. En cuanto a los tres residuos con mayores volúmenes de generación a nivel mundial, se encuentran, en orden de generación, los RDCs, la escoria de acero y el lodo rojo proveniente de la producción de aluminio. Esta proporción se mantiene en España, aunque con una mayor disponibilidad de lodo rojo. La comparativa entre la producción nacional e internacional se muestra en la Figura 6.

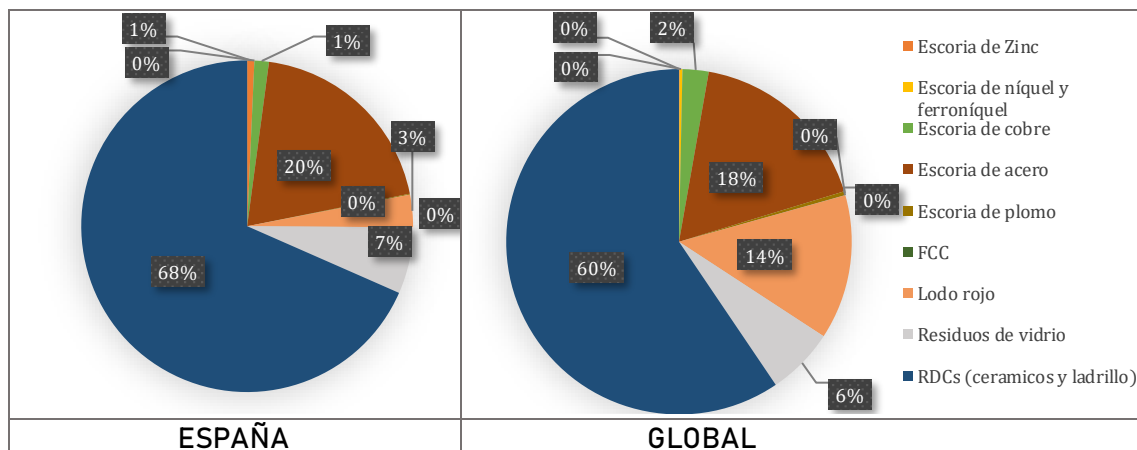


Figura 6. Distribución de potenciales precursores para MAA en España y en el mundo.

Fuente Tabla 8.

3.3.1 Procedimiento

Con base en lo expuesto anteriormente, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda en toda España para identificar las empresas y localidades que cuentan con los nueve residuos identificados.

3.3.2 Resultados

Los residuos se encuentran distribuidos principalmente en la periferia de la península, así como en algunos sectores centrales aislados. En los alrededores de Barcelona, se encuentran diversos puntos con disponibilidad de escoria de cobre, FCC y RDCs. El FCC, por su parte, se encuentra distribuido en todo el territorio nacional.



Figura 7. Mapa de residuos disponibles en España. Fuente: Directorio de empresas INFORMA, Empresas del proyecto marco y reportes empresariales [58][47][59].

En cuanto al lodo rojo, solo existe un punto de depósito, pero con volúmenes muy significativos, localizado en la parte noroeste del país. En cuanto a la escoria de acero y de cobre, existen numerosas fuentes ubicadas tanto en el sur como en el norte. La distribución mencionada y las ubicaciones se pueden apreciar con mayor claridad Figura 7 y en la Tabla 9.

Los residuos de escoria de zinc, níquel y plomo, dentro de los nueve tipos seleccionados, presentan volúmenes de generación anual inferiores a 0,1 Mt y representan porcentajes por debajo del 1% tanto a nivel mundial como nacional en comparación con los otros residuos. Por lo tanto, estos residuos no constituyen una fuente atractiva para el desarrollo de un material de uso real.

El residuo de FCC se obtiene de las refinerías de petróleo, las cuales, debido a su distribución a nivel global y nacional, pueden resultar atractivas como fuente, que se refleja en un mayor número de publicaciones. En España, se identificaron siete refinerías como posibles fuentes de FCC, que cubren casi toda la península.

Tabla 9. Primer grupo de residuos disponibles para activación alcalina en España.

Precursor	Origen y descripción	Posible fuente
<i>Residuo de Catalizador de craqueo catalítico</i>	Refinerías de petróleo, se usa en el proceso de rotura de cadenas de hidrocarburos de elevado peso molecular para obtener una mayor proporción de gasolina. Son retirados cuando tienen baja actividad catalítica y otros se recogen en los precipitadores electrostáticos.	Castellón Omya Clariana S.A Tarragona La rábida San Jorge Cartagena Tenerife Puerto llano Asesa Bilbao La Coruña
<i>Residuo de industria de aluminio: Lodo rojo, arena roja de bauxita</i>	Es el principal residuo del refino de alúmina y presenta una alta alcalinidad. Es un subproducto alcalino del proceso de Bayer para la extracción de alúmina, donde el mineral de bauxita se digiere en soluciones de NaOH. Una vez que se ha recuperado la mayor parte del Al, el residuo sólido del mineral, que generalmente contiene una cantidad significativa de NaOH arrastrado, se deshidrata y se envía a grandes represas de relaves.	San cibrao, Lugo
<i>Residuos de vidrio</i>	Reciclaje de: Botellas de alimentos, residuos de construcción y demolición, Lámparas fluorescentes.	Catalunya Madrid Valencia Zaragoza
<i>Escoria de cobre</i>	La escoria de cobre se obtiene luego del proceso de fundición conversión y mezclado en la fabricación de cobre. Durante la fase de fundición, el agente reductor (sílice) separa los sulfuros y óxidos, que están presentes en los minerales de cobre. Los sulfuros no producen aniones y desarrollan la fase mate (rica en cobre) y el agente reductor se combina con el óxido para formar la fase de escoria (rica en impurezas). El enfriamiento con agua de la escoria produce escoria vítrea, amorfa y granulada. También pueden provenir de desechos de minería de cobre.	Catalunya Huelva Valencia Zaragoza Asturias
<i>Escoria de acero</i>	Se genera en la fabricación del acero y puede provenir del: horno de oxígeno básico (HOB) horno de arco eléctrico (HAE), o de un horno de cuchara (HC). El acero inoxidable, se puede producir en un HAE, HC o de descarburación-oxígeno con argón. La escoria de HOB tiene mejor desempeño y más alcalinidad. El en proceso de enfriamiento las escorias son de color negro vítreo, mientras que las que son enfriadas con agua son amorfas y granuladas.	Catalunya Alicante Cádiz Asturias Cantabria País vasco Castilla y león Valencia
<i>Cerámicos</i>	Residuo de ladrillo rojo cocido proveniente de paredes de edificaciones demolidas y de defectos de fabricación en fábrica. Testillo cocido proveniente del proceso de fabricación de acabados tipo azulejo.	Girona Madrid

Sin embargo, el volumen de FCC generado anualmente, tal como se muestra en la Tabla 8, se calculó utilizando datos de solo dos refinerías debido a la falta de información pública, por lo tanto, se estima que el volumen real de FCC es considerablemente mayor. Teniendo en cuenta lo anterior, se incluye el residuo de FCC entre los residuos preseleccionados.

La disponibilidad reflejada en la producción anual es un criterio de preselección importante en la búsqueda de un cementante alternativo. A pesar de ello y aunque exista un interés en el aprovechamiento de muchos residuos solicitados a las diferentes empresas españolas, algunos fueron descartados por potenciales problemas de manipulación previstos en la campaña experimental.

El residuo de lodo rojo, la escoria de plomo y los residuos de lámparas fluorescentes pueden contener componentes peligrosos o requerir condiciones experimentales complejas para alcanzar la etapa de fabricación del prefabricado, en la cual se alcanza el nivel de implementación. Investigaciones previas han encontrado que el residuo de lodo rojo de bauxita de la fábrica de aluminio de ALCOA, que es la única fuente nacional, puede contener componentes peligrosos radioactivos como ^{238}U , ^{232}Th , y ^{40}K [60].

3.3.3 Sumario

Podemos resumir los criterios de preselección en la siguiente tabla:

Tabla 10. Criterios de selección para primer grupo de residuos.

Precursor	Interés investigativo nacional	Seguridad ocupacional	Volúmenes altos disponibles
<i>Escoria de Zinc</i>	+	+	-
<i>Escoria de níquel</i>	+	+	-
<i>Escoria de cobre</i>	+	+	+
<i>Escoria de acero</i>	+	+	+
<i>Escoria de plomo</i>	+	-	-
<i>Residuo de catalizador de craqueo catalítico</i>	+	+	±
<i>Lodo rojo de bauxita</i>	-	-	+
<i>Residuos de vidrio</i>	+	±	+
<i>RDCs cerámicos</i>	+	+	+

Los residuos de lámparas fluorescentes disponibles presentaron un contenido de mercurio de 1,6 mg/kg. Aunque no existe una normativa ambiental que establezca los valores para cuantificar el riesgo de contacto con residuos que contengan Hg, el


reglamento (UE) 2018/73 de la comisión de 16 de enero de 2018 establece límites máximos de mercurio en alimentos por debajo de 0,05 mg/kg, y el NTP 184 presentado por el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España establece que el mercurio en un ambiente de trabajo debe estar entre 0,05 y 0,1 mg/m³ [61]. La presencia de estos componentes requiere condiciones experimentales especiales fuera del alcance de las instalaciones donde se llevó a cabo la presente investigación, lo que representa dificultades aún mayores en la etapa de prototipado de los elementos prefabricados.

Teniendo en cuenta lo anterior los cinco residuos preseleccionados para el inicio de los ensayos fueron: Escorias de cobre, escorias de acero, Residuos de vidrio, Residuo de Catalizador de craqueo catalítico y RDCs cerámicos.

3.3.4 Materiales adquiridos para el estudio


Para el presente estudio fue posible obtener un tipo de escoria blanca de acero.



Tabla 11. Escoria blanca de acero recibida para la evaluación experimental.

Tipo	Nombre	Descripción	Imagen
<i>Escorias metalúrgicas</i>	<i>E-B</i>	Escoria de acero blanca.	

Dentro de escorias de cobre se pudieron recibir tres tipos de diferente origen.




Tabla 12. Escorias de cobre recibidas para la evaluación experimental.

Tipo	Nombre	Descripción	Imagen
<i>Escorias de cobre</i>	<i>EC-1</i>	Escoria de cobre origen 1 Atlantic copper.	

	<i>EC-2</i>	Escoria de cobre origen 2, La Farga.	
	<i>EC-3</i>	Escoria de cobre origen 3, La Farga.	

Dentro de los Cerámicos disponibles se pudieron obtener dos tipos de Testillo que fueron: Testillo cocido fino y Testillo grueso. También se pudo encontrar dos tipos de RDC de ladrillo rojo: Uno cerámico RDC-C y otro de mampostería RDC-M.



Tabla 13. RDC tipo cerámica y ladrillo rojo recibidos para la evaluación experimental.

Tipo	Nombre	Descripción	Imagen
<i>RDC</i>	<i>RDC-M</i>	Residuos de construcción y demolición. Ladrillo.	
	<i>RDC-C</i>	Residuos de construcción y demolición. Cerámica.	
<i>Cerámicos</i>	<i>TC-G</i>	Testillo cocido grueso	

	TC-F	Testillo cocido fino	
--	------	----------------------	--

Dos FCC fueron recibidos para pruebas experimentales. El material ha sido denominado como Catalizador de origen A (CA) y catalizador origen H (CH) y se describen a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14. FCC recibido para la evaluación experimental.







Tipo	Nombre	Descripción	Imagen
FCC	CA	Residuo de catalizador de craqueo catalítico origen Algeciras.	
FCC	CH	Residuo de catalizador de craqueo catalítico origen Huelva.	

En el marco de la presente investigación, se adquirieron de forma preliminar dos tipos de vidrio para su evaluación. Estos materiales se clasificaron como lodos de vidrio y vidrio, y se describen a continuación.

En cuanto a los vidrios, se evaluaron cuatro tipos. En primer lugar, se evaluaron los vidrios de lámparas fluorescentes (V-F). Luego, se evaluaron los vidrios de lámparas fluorescentes combinados con otros tipos de vidrios de iluminación (Vmix). Por último, se evaluaron los vidrios de botellas de contenedor con residuos de cerámica y papel (V-C+P).

En cuanto a los lodos de fabricación de vidrio, se recibieron tres tipos. Uno de ellos provenía de los lodos de la depuradora (VL-D), otro provenía de la máquina cortadora (VL-M), y una tercera tipología contenía fracciones de los dos anteriores (VL-mix).

Tabla 15. Materiales provenientes de la fabricación o reciclaje de vidrio recibidos para evaluación experimental.

Tipo	Nombre	Descripción	Imagen
<i>Lodos de fabricación de vidrio</i>	<i>VL-D</i>	Lodos de fabricación de vidrio provenientes de la depuradora.	
	<i>VL-M</i>	Lodos de fabricación de vidrio provenientes de la maquina cortadora	
	<i>VL-mix</i>	Lodos de fabricación de vidrio provenientes de la maquina cortadora y de depuradora.	
<i>Vidrio</i>	<i>VF</i>	Vidrios de lámparas fluorescentes.	
	<i>V-mix</i>	mezcla de vidrios de bombillas bajo consumo, bombillas HID entre otros de diferentes orígenes	
	<i>V-C+P</i>	Vidrio + cerámica + papel (puede contener otros residuos asociados a envases)	

A continuación, se resume el grupo de materiales adquiridos para pasar al análisis de aptitud.

Tabla 16. Residuos adquiridos para análisis de aptitud.

Clasificación	ID	Residuo
i	<i>VL-mix-1</i>	Mezcla de lodos de vidrio de fábrica
i	<i>V-LM-1</i>	Lodos de vidrio de fabrica zona: máquina cortadora
i	<i>V-LD-1</i>	Lodos de vidrio de fabrica zona: depuradora
u	<i>V-mix-1</i>	Mezcla de vidrios de iluminación
u	<i>VF</i>	Vidrios de lámparas fluorescentes
u	<i>V-C+P</i>	Fracción no reciclable de vidrio de contenedor con cerámica y etiquetas de papel
u	<i>RDC-M</i>	Residuos de construcción y demolición. Ladrillo rojo de rechazo de fábrica
i	<i>RDC-C</i>	Residuos de construcción y demolición. Cerámicos.
u	<i>T-C-G-1</i>	Testillo cocido grueso
u	<i>T-C-F-1</i>	Testillo cocido fino
i	<i>C-A-1</i>	catalizador de craqueo catalítico
	<i>C-H-1</i>	catalizador de craqueo catalítico
i	<i>E-B</i>	Escoria de acero blanca
	<i>E-C-1</i>	Escoria de cobre origen 1
	<i>E-C2-1</i>	Escoria de cobre origen 2
	<i>E-C3-1</i>	Escoria de cobre origen 3

u= Urbanos i= industriales

3.4 ANÁLISIS DE APTITUD DE LOS MATERIALES

Dentro del análisis de aptitud, se llevó a cabo el acondicionamiento y la primera caracterización física y química de los materiales seleccionados como posibles precursores. Era necesario que los residuos, como materiales precursores, cumplieran con unas condiciones físicas mínimas, tales como un bajo contenido de humedad, eliminación de impurezas y alta finura.

3.4.1 Acondicionamiento

Algunos de los diferentes residuos captados ya cumplían con las condiciones necesarias, mientras que otros tuvieron que ser acondicionados, ya que no estaban aptos para la realización de los ensayos de caracterización. Durante el

acondicionamiento, las mayores dificultades se presentaron debido a la presencia de material orgánico, fibras y elementos completamente ajenos a los residuos. Un ejemplo de esto es la presencia de fibras vegetales en el lodo de vidrio, producto de su exposición al ambiente exterior, así como la presencia de corchos y residuos metálicos en el material proveniente de los contenedores de vidrio. En algunas ocasiones, incluso se encontraron residuos de alimentos y restos óseos en los residuos.

		
V-C+P material original (2 cm)	Elementos inorgánicos	Elementos orgánicos

Tabla 17. Elementos removidos del material tipo vidrio con cerámica y papel (V-C+P).

		
EC-1 material original (>9 cm)	Molido en molino de bolas EC-2 (<1 cm)	EC-3 muestra para ensayos químicos.
		
VL material original, lodo.	VL- mix secado	VL-mix muestra para ensayos químicos.
		
V-C+P Trituración en planta (<50 mm)	Triturado en molino de anillos (<0,1 mm)	V-C+P muestra para ensayos químicos.

Tabla 18. Ejemplo de acondicionamiento de algunos materiales.

El acondicionamiento implicó llevar a cabo actividades como la separación de las fracciones deseadas, el secado y la reducción del tamaño de partícula. Una vez que se recibieron los residuos en su forma más homogénea, se procedió a la molienda para alcanzar un diámetro de partícula inferior a 0,075 mm. Una vez que se logró la finura mencionada, los materiales pudieron ser sometidos a ensayos químicos para su caracterización.

Algunas muestras requirieron algún tipo de acondicionamiento especial debido a su origen. Las muestras V-C+P fueron incineradas para retirar las etiquetas y posteriormente evaluar si la composición química del material en su estado más fino presentaba alguna diferencia significativa. La incineración no fue necesaria para las muestras posteriores, ya que se comprobó que no había cambios perceptibles en la composición química. Los lodos de vidrio (VL-D, VL-M y VL-mix) requirieron la separación de material orgánico, como raíces, debido a que se depositaron en un entorno natural. Por último, la escoria de cobre EC-1 presentaba una dureza y un tamaño tan grandes (> 9 cm, ver Tabla 18) que requirieron trituración previa.

En la Tabla 19 se pueden observar los diferentes tratamientos aplicados a cada uno de los materiales. Los residuos industriales, como los catalizadores y las escorias (C y E), solo necesitaron ser tamizados para confirmar el tamaño máximo de partícula para los ensayos (0,075 mm), dado que su proceso industrial de origen les proporcionó una finura muy alta y una baja humedad.

3.4.2 Características físicas

Para cada una de las muestras, se llevaron a cabo mediciones de humedad, densidad (UNE EN 1097-6:2013) y área superficial específica (SE) mediante el método BET (UNE-ISO 9277:2009). A las muestras con partículas que pasaron el tamiz de 4,0 mm se les realizó el ensayo de densidad utilizando el método del picnómetro. En la Por último, los lodos de vidrio poseen una absorción muy elevada, entre el 19% y el 65%, lo cual es correspondiente a sus superficies específicas más altas y a su naturaleza de lodo fino.

se resumen las propiedades físicas mencionadas para cada uno de los residuos preseleccionados.

A partir de los resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

I. Humedad

Los vidrios y las escorias no retienen agua en su estructura, y los rangos de humedad para estos materiales están por debajo del 0,1%. Los catalizadores y el Testillo grueso, poseen humedades inferiores al 2%. Los residuos de ladrillo rojo y Testillo fino presentan humedades altas, situadas en un rango aproximado entre el 11% y el 15%.

Tabla 19. Acondicionamiento aplicado a cada uno de los residuos.

Nombre de Muestra	Otro	Secado	Trituración molino de anillos.	Tamizado 75 µm.
<i>VF</i>	Chequeo de contenido de mercurio.		X	X
<i>V-mix</i>	-		X	X
<i>V-C+P</i>	Trituración manual martillo < 1 cm.		X	X
<i>RDC-C</i>	-	X	X	X
<i>RDC-M</i>	-	X	X	X
<i>VL-mix</i>	-	X	X	X
<i>V-LM</i>	-	X	X	X
<i>V-LD</i>	Separación de materia orgánica (raíces)	X	X	X
<i>TC-G</i>	-	X	X	X
<i>TC-F</i>	-	X	X	X
<i>CA</i>	-			X
<i>CH</i>	-			X
<i>EB</i>	-			X
<i>EC-1</i>	-		X	X
<i>EC-2</i>	Trituración previa.		X	X
<i>EC-3</i>	Trituración previa.		X	X

Por último, los lodos de vidrio poseen una absorción muy elevada, entre el 19% y el 65%, lo cual es correspondiente a sus superficies específicas más altas y a su naturaleza de lodo fino.

Tabla 20. Caracterización física. *<0.01 no detectable. ** ensayos de informes confidenciales suministrados por la empresa proveedora.

MUESTRA	HUMEDAD (%)	DENSIDAD (Kg/m ³)	SE [m ² /g]
<i>V-F</i>	0	1662	5,921
<i>V-mix</i>	0	1757	3,079
<i>V-C+P</i>	0,08	1675	1,520
<i>VL-M</i>	59,24	2,16	10,480
<i>VL-D</i>	65,58	2,08	25,960
<i>VL-mix</i>	19,92	1,93	5,701
<i>RDC-C</i>	15,15	2,45	0,828
<i>RDC-M</i>	13,45	2,39	4,166
<i>EB</i>	0	1623	1,910
<i>EC-1**</i>	0	3,91	ND*
<i>EC-2</i>	0	1856	4,233
<i>EC-3</i>	0	1859	3,911
<i>TC-G</i>	0,21	1699	3,633
<i>TC-F</i>	11,10	1654	6,938
<i>C-A</i>	1,53	1,8	149,348
<i>C-H</i>	1,12	1,75	190,371

II. Densidad

Los lodos de vidrio y los RDC (Residuos de Demolición y Construcción) presentan densidades muy cercanas o mayores a los 2000 kg/m³. En un segundo grupo se encuentran las escorias de cobre y los catalizadores, con densidades alrededor de los 1800 kg/m³. Por último, los vidrios, el Testillo y la escoria de acero presentaron densidades inferiores a las mencionadas. La densidad del cemento es alrededor de unos 3150 kg/m³, muy superior a las encontradas en los residuos. Por lo tanto, se espera que los volúmenes en las proporciones de mezcla sean mayores a los encontrados en los diseños de mezcla con cemento.

III. Superficie específica (SE)

En la Por último, los lodos de vidrio poseen una absorción muy elevada, entre el 19% y el 65%, lo cual es correspondiente a sus superficies específicas más altas y a su naturaleza de lodo fino.

se puede observar que los residuos, para la molienda aplicada, presentan valores muy altos de SE en comparación con la superficie específica del cemento ($0,2600 \text{ m}^2/\text{g}$). Los lodos de vidrio poseen entre 4 y 9 veces la SE del cemento, lo cual podría influir en su alta absorción, pero también contribuir a su reactividad. Los catalizadores, por su parte, presentan una SE del orden de los $150 \text{ m}^2/\text{g}$, una cifra bastante elevada encontrada por varios autores en investigaciones previas[62][33]. Una superficie específica elevada puede significar un aumento en las relaciones agua/cemento, y si el agua se mantiene en la estructura sin reaccionar, perjudicaría la resistencia del material.

La forma de las partículas puede determinar algunas propiedades. En la Anejo 5 se muestran fotografías de microscopía electrónica de barrido para los diferentes tipos de materiales. La diferencia entre las partículas de la escoria de acero, el Clinker y la escoria de alto horno es casi imperceptible [63]. Las partículas de escoria de cobre son angulosas y tienen tamaños variables entre 500 y $25 \mu\text{m}$ [64]. El FCC (Catalizador de Craqueo Catalítico Fluidizado) presenta partículas en forma de microesferas con superficies irregulares y un amplio rango de diámetros [65]. En los cerámicos, incluido el ladrillo rojo, se observa una forma irregular de las partículas molidas y poca porosidad [66]. Las partículas de polvo de vidrio reciclado exhiben una forma irregular, superficie lisa y bordes afilados[67].

3.4.3 Características químicas

Para la consecución de un material cementante, es indispensable la existencia de fuentes de silicio y aluminio o calcio en su composición [68]. Los datos del FRX muestran los primeros indicios de la presencia de los elementos mencionados, lo que permite clasificar los materiales en cuatro grupos para un análisis más compacto: Grupo 1: Vidrios, Grupo 2: Escorias, Grupo 3: Catalizadores, Grupo 4: Cerámicos (ladrillo rojo y Testillo cocido). Esta clasificación se mantendrá para los demás análisis químicos realizados.

Los resultados del DRX con muestran la presencia de diferentes fases cristalinas. A partir de los resultados, se aplicó el método Rietveld para determinar el porcentaje amorfo de cada residuo.

En esta etapa, se evaluaron los 16 subproductos mencionados en la Tabla 16 .

IV. Procedimiento

Para los análisis de FRX, DRX y RMN las muestras fueron previamente molidas en polvo de forma manual en un mortero de ágata y/o pulverizadas en un molino de anillos cuando fue necesario y/o cuando no presentaban un tamaño de partícula suficientemente fino ($<75 \mu\text{m}$). En la Figura 8 se pueden observar las 16 muestras estudiadas. En el caso de la escoria de cobre EC-1, la molienda representó inconvenientes importantes debido a su plasticidad y dureza, lo que impidió reducir su tamaño a menos de 0,5 mm. A pesar de esto y de su alto contenido de metales, se pudieron realizar algunas caracterizaciones.

Al ser ensayos genéricos, las condiciones de los análisis se describen en el apartado METODOLOGÍA GENERAL.





Figura 8. Muestras pulverizadas para análisis químicos.

V. Resultados

FRX

Los valores de aluminio, silicio y calcio se presentan resumidos en la Figura 9, allí los valores fueron recalculados sin tener en cuenta la pérdida por ignición (LOI). Los resultados del FRX se pueden encontrar completos en el Anejo 1.

Los porcentajes de óxido muestran que los vidrios, los lodos de vidrio y los cerámicos presentan cantidades de SiO_2 superiores al 60 %, mientras que las escorias en general presentan porcentajes inferiores al 30 %. Los porcentajes de Al_2O_3 son muy altos en los catalizadores y muy bajos en los vidrios. Las escorias de acero (EB) presentan altos porcentajes de CaO , Mientras que las escorias de cobre (EC) pueden tener valores inferiores al 3 %. Las escorias de cobre tienen una composición cercana a las cenizas volantes, mientras que las escorias de acero se asemejan más a la composición del cemento Portland.

De acuerdo a los porcentajes de los diferentes elementos se han clasificado a los materiales en 4 grupos que se describen a continuación. La clasificación, que concluye los aspectos fundamentales obtenidos del FRX se recoge en la Tabla 22.

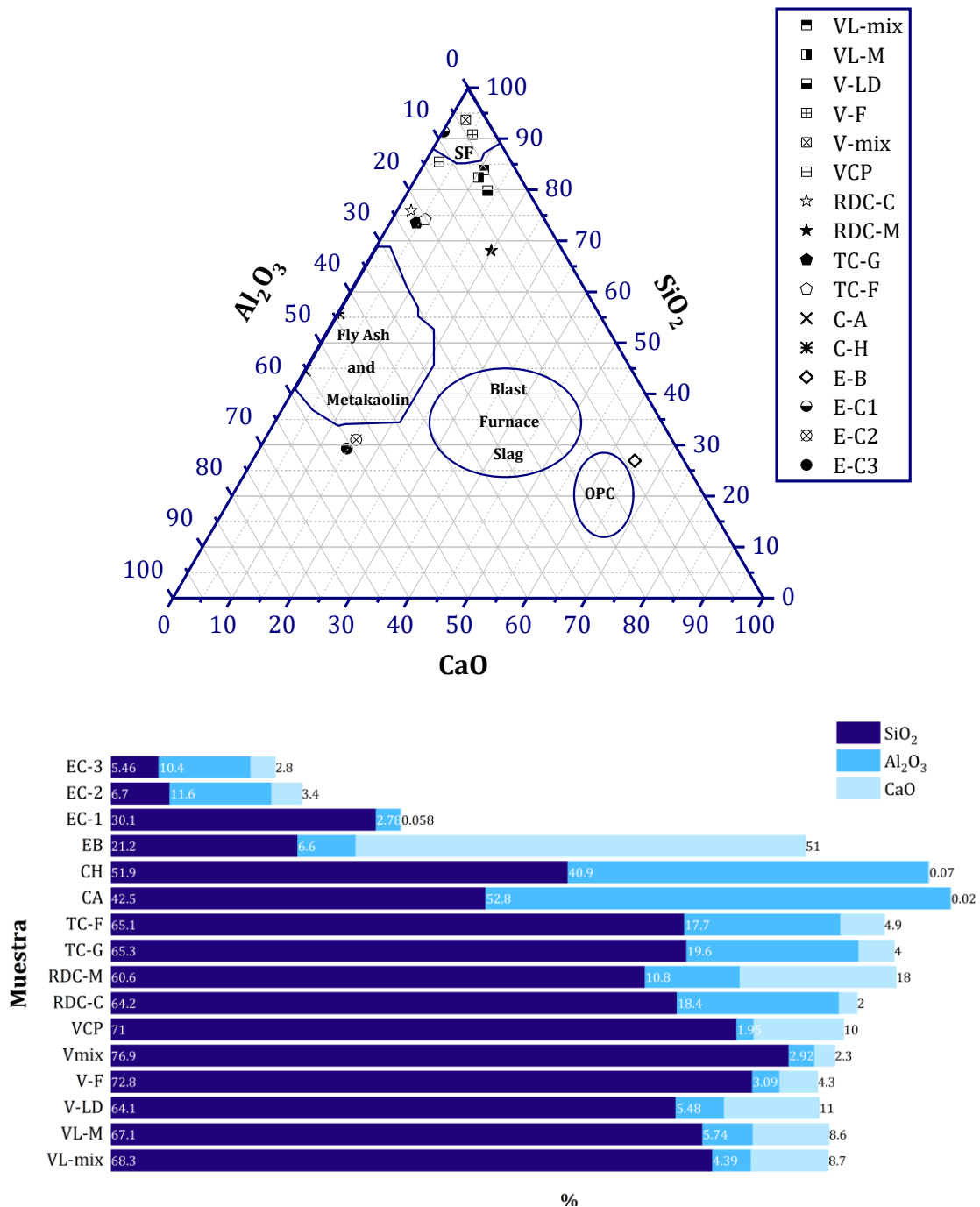


Figura 9. Composición química de materiales según FRX.

Grupo I: Vidrios

El diagrama ternario de la Figura 9 muestra que la cantidad de SiO₂ en los vidrios y lodos de vidrio es la más alta en comparación con los otros materiales, con valores entre el 64% y el 77%. En los materiales vitreos estudiados, el aluminio presenta valores inferiores al 6%, y en el Anejo 1 se puede observar un alto contenido de Na (superior al

10%). Este tipo de materiales tiene una composición similar al humo de sílice (ver Figura 9).

Grupo II: Escorias

Las escorias siderúrgicas no son comparables entre sí. Las escorias de acero presentan alrededor del 20% de SiO_2 . Las escorias de cobre EC-2 y EC-3 tienen valores muy bajos de SiO_2 , inferiores al 6%, mientras que la EC-1 tiene un 30% de SiO_2 . En cuanto al aluminio, las escorias de acero presentan valores del 6%, mientras que las de cobre tienen cerca del 10%. En cuanto al contenido de CaO , las escorias de acero presentan un 49%, mientras que las de cobre tienen menos del 3%. Las escorias de cobre tienen una composición cercana a las cenizas volantes, pero las de acero se asemejan más a la composición del cemento Portland (ver Figura 9).

Grupo III: Catalizadores

Los catalizadores prácticamente no presentan CaO , y tanto Al_2O_3 como SiO_2 son los componentes mayoritarios del material, con valores superiores al 40%.

Grupo IV: Cerámicos

Los RDCs y los TCs presentan un punto medio en los elementos analizados. Su contenido de SiO_2 se encuentra entre el 52% y el 66%, y a diferencia de los vidrios, poseen un contenido de aluminio entre el 9% y el 19%. También presentan contenidos bajos de CaO , excepto el RDC-M, que alcanza un 17%.

Homogeneidad

La homogeneidad de un residuo es muy importante para su uso como materia prima, lo que significa que los materiales deben presentar las mismas características, independientemente de su origen. En este sentido, los datos evidencian que los vidrios presentan una composición muy similar sin importar su origen. Las mayores variaciones se encuentran en el contenido de calcio, que para las lámparas fluorescentes y la mezcla de vidrios, presenta valores de calcio de 4,29% y 2,26%, respectivamente, mientras que para los otros subproductos de vidrio se encuentra alrededor del 10%.

Los catalizadores presentan una pequeña diferencia en su contenido de fósforo, mientras que los cerámicos (RDCs y TCs) presentan diferencias en su contenido de hierro, sodio y potasio.

Sólo se tuvo una fuente de escoria de acero para analizar, por lo que no se puede evaluar su variabilidad a partir de los datos. En el caso de las escorias de cobre, se encontraron grandes diferencias. Las escorias EC-2 y EC-3 presentan una composición muy similar, con ligeras diferencias en el contenido de magnesio. Sin embargo, hay grandes diferencias con respecto a la escoria EC-1, la cual está compuesta principalmente por hierro (59 %), mientras que las otras escorias contienen cobre y fósforo en conjunto (43 %). La EC-1 contiene seis veces más silicio y tres veces menos aluminio. Por lo tanto, si se pretende utilizar la escoria de cobre como materia prima, se requieren una vigilancia rigurosa para asegurar su homogeneidad.

Tabla 21. Residuos recomendados para la fase 2 según FRX.

Tipo	Residuo	Id	Descripción
<i>u</i>	Vidrios	<i>V-C+P</i>	Vidrio de contenedor con cerámica
<i>i</i>	Cerámicos	<i>RDC-M</i>	RDC Ladrillo rojo
<i>u</i>		<i>TC-F</i>	Testillo cocido fino
<i>i</i>	Catalizador	<i>CA</i>	Catalizador de craqueo catalítico

Sumario

Debido a la dificultad de la molienda, la falta de homogeneidad y la presencia de elementos como plomo y cromo en las escorias de cobre, no se recomienda la evaluación para la fase 2. En cuanto a los demás materiales, su homogeneidad permite elegir uno de cada grupo, teniendo en cuenta la facilidad logística y la disponibilidad para el estudio. De esta manera, en esta etapa se definen los siguientes residuos como aptos para la siguiente fase, modificando la Tabla 9 y tomando como base los análisis de FRX.

Tabla 22. Subproductos recomendados para la activación teniendo en cuenta los resultados de la FRX.

Grupo	Característica	Nombre	Muestras	Material asemejado	Homogeneidad según origen
<i>I</i>	Elevado Si >50%	Vidrios Lodos de vidrio	V-C+P, VL-M, VL-D, VI-mix, Vmix, VF	Humo de sílice	Muy homogéneo
<i>II</i>	Bajo Si <30%	Escorias	EC1 EC-3 EB	Cenizas volantes o cemento portland	Poco homogéneo*
<i>III</i>	Sin CaO Alto Al	Catalizadores	CA y CH	Metacaolín	alta
<i>IV</i>	Contenido diverso	Cerámicos	RDC y TC	Entre humo de sílice y Cenizas volantes	Media**
* Entre las escorias de cobre principalmente					
** Con variaciones en los componentes minoritarios.					

Independientemente de la tabla anterior, se realizaron las siguientes caracterizaciones de todos los materiales con el objetivo de identificar más características que pudieran influir en la selección de los materiales para la fase 2.

DRX con Rietveld

Los resultados del DRX con el análisis Rietveld permitieron conocer las diferentes fases cristalinas y la fase amorfa de los materiales. La desviación de la línea base entre 15-40 grados 2θ de los difractogramas, sugiere la presencia de material amorfo [69][70].

Los vidrios, los lodos de vidrio y las escorias, en su orden, mostraron un mayor porcentaje amorfo en las muestras, lo cual puede ser un indicador de una mayor reactividad.

En la Figura 10, Figura 11, Figura 12 y en la Figura 13, se pueden encontrar los difractogramas para cada residuo, y en el Anejo 2 se encuentran los datos completos del análisis DRX con Rietveld. A continuación, se presenta la descripción de los resultados por grupo.

Grupo I: Vidrios

En los vidrios en general, el porcentaje amorfo representa más del 90% de la muestra. En los lodos de vidrio (muestras "VL") y los vidrios de contenedor con cerámica (V-C+P), se detectaron fases cristalinas de cuarzo (SiO_2) y coesita en porcentajes inferiores al 2%. En el caso de los lodos de vidrio, se encontró presencia de CaCO_3 en forma de calcita, aragonita, y también fueron detectadas algunas trazas de Periclasa (MgO). Los lodos de vidrio presentaron porcentajes amorfos ligeramente menores que los otros vidrios, lo que coincide con el menor contenido de silicio con respecto a los demás subproductos de vidrio. No se detectaron fases cristalinas en los casos puntuales de los vidrios provenientes de lámparas fluorescentes y mezcla de vidrios (VF y V-mix).

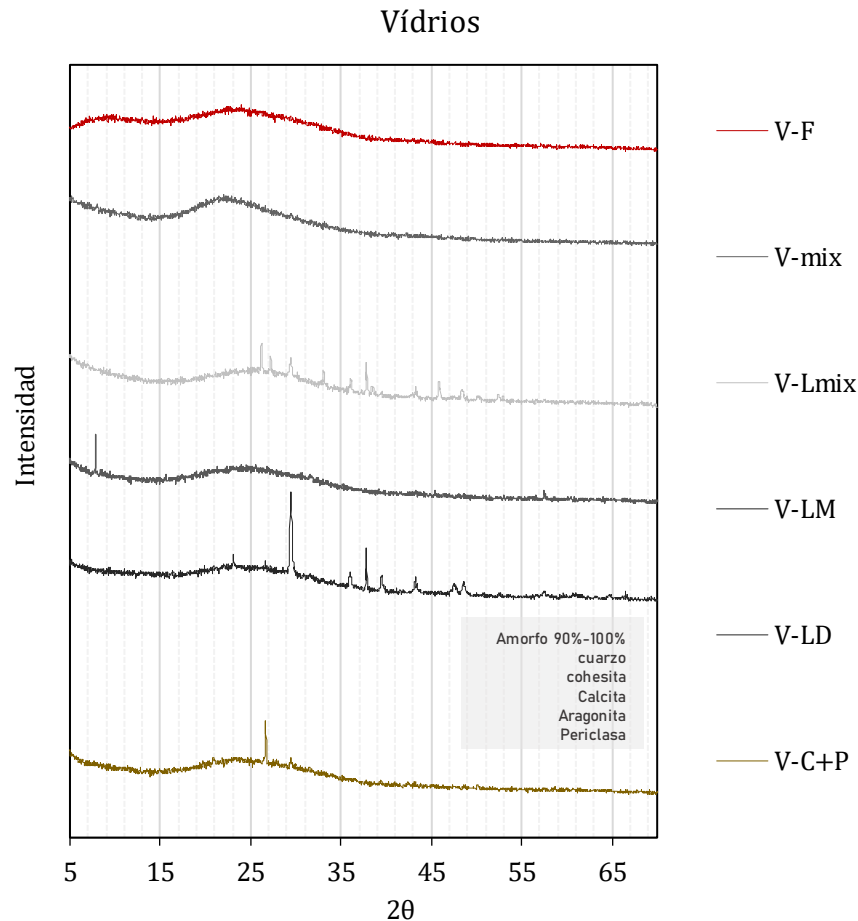


Figura 10. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Vidrio.

Los vidrios presentan mayor porcentaje amorfo que contenido de silicio. En el FRX se detectaron valores de 70-60% de SiO_2 mientras que el porcentaje amorfo presentó valores de 90-100% debido a que todo el aluminio también es amorfo y la existencia de compuestos con sodio y calcio amorfo diferentes a NaCl y CaCO_3 .

Grupo II: Escorias

Para las escorias, al igual que en el FRX los datos fueron muy diferentes entre la escoria de acero y la de cobre. La escoria de acero presentó un porcentaje amorfo del 50% y sus fases cristalinas están representadas principalmente por C_2S gamma (2CaSiO_2), que se encuentra alrededor del 22%. En menor proporción (3%-2%), encontramos Periclasa (MgO), Corsidierita ($2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$), Portlandita (Ca(OH)_2) y C_2S Alpha L (2CaSiO_2). Los componentes amorfos

En las escorias de cobre, hay una gran diferencia entre la muestra EC-1 y las dos últimas muestras EC-2 y EC-3, tal como se encontró en el análisis FRX.

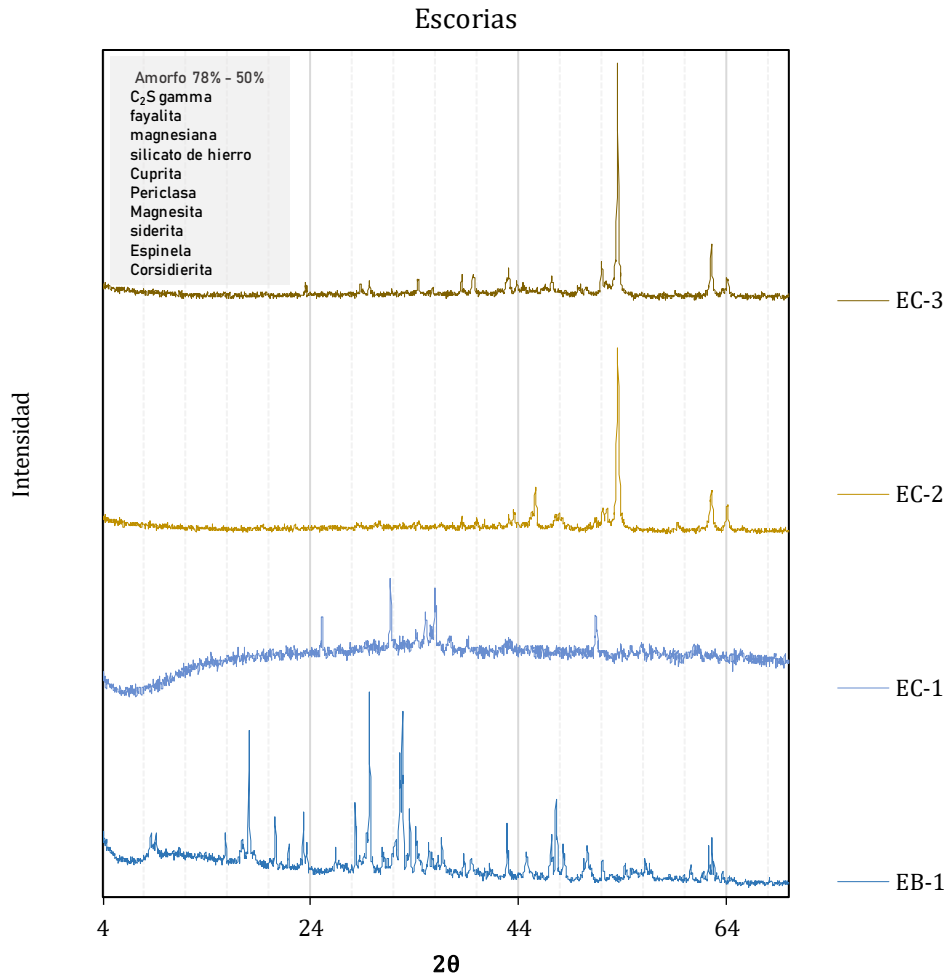


Figura 11. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Escoria.

Las escorias EC-2 y EC-3 presentan porcentajes amorfos de 58% y 63% respectivamente, y contienen más de 10 fases cristalinas. La mayor parte de las fases cristalinas de EC-2 y EC-3 están representadas en Cuprita (Cu_2O) con más de un 12%, y también se encuentran fases con contenido de magnesio como Periclasa (MgO) y Magnesita (MgCO_3), además de fases ferrosas como siderita (CuCrFeO_4) y espinela, entre otras. Mientras que la primera escoria EC-1 presenta un porcentaje amorfoso mucho más alto (78%) y su parte cristalina está compuesta de fayalita magnesiana (Fe_2SiO_4) en una proporción del 19% y un 2,7% de silicato de hierro.

Las diferencias recurrentes en este segundo análisis entre la EC-1 y las EC-2 y EC-3 dejan de manifiesto la falta de homogeneidad mencionada en el apartado anterior. La heterogeneidad de las escorias se podría explicar por el hecho de que el origen de las dos últimas muestras es diferente y también podría haber una diferencia en el punto de generación del proceso de fabricación del cobre.

Las fases amorfas de la EB son debidas al Ca mayoritariamente mientras que para las escorias todo el aluminio es amorfo y otros compuestos basados metales de hierro y cobre.

Grupo III: Catalizadores

El CA tiene un porcentaje amorfo muy alto, 87%, mientras que el CH solo un 48%. Aunque la composición de fases cristalinas de ambos es principalmente Zeolita y Silicalita, que son básicamente silicio, las proporciones de fases cristalinas para el CH son mayores y contiene una fase cristalina adicional de Mullita 3:2 ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) que representa un 27% de la muestra.

Para el CA todo el aluminio es amorfo mientras que para el CH hay parte de aluminio en compuestos cristalinos. El porcentaje amorfo del CA se basa es principalmente en compuestos de Aluminio, mientras que para el CH el porcentaje amorfo se basa principalmente en compuestos de silicio.

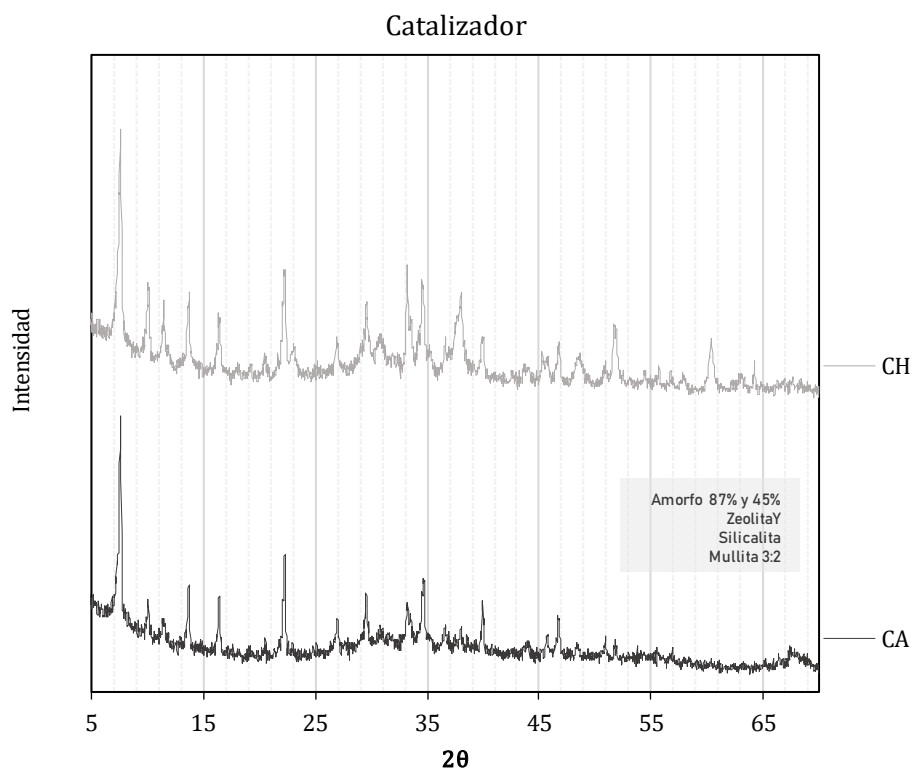


Figura 12. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Catalizador.

Grupo IV: Cerámicos

Los RDC y los TC presentan un amorfismo promedio de 45,3%. Estos materiales tienen fases cristalinas representadas principalmente por Cuarzo, Calcita, Rutilo, Ilita, Albita, Anortita y Hematita. La gran diferencia es que los RDC-M tienen altos contenidos de Calcita (11-39%), mientras que el TC-F y el TC-G no presenta esta fase. Lo anterior quiere decir que el calcio del testillo tiene una mayor fracción amorfa.

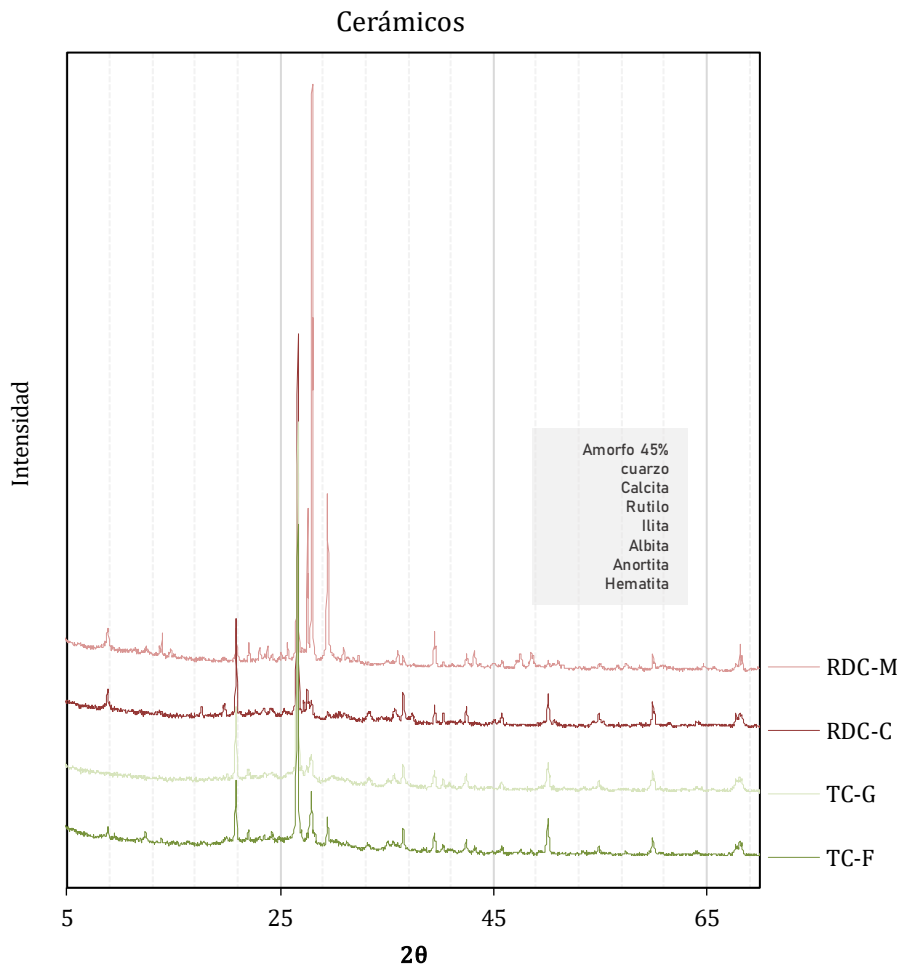


Figura 13. Diagrama DRX para muestras de residuos tipo Cerámicos.

Lo anterior coincide con lo encontrado en el FRX. Ambos tipos de residuos presentan fases cristalinas con aluminio en forma de Ilita, Anortita y Albita, las cuales superan en porcentaje el 10% del total de la muestra.

En la Figura 14 es evidente que el porcentaje amorfo de los materiales no se corresponde necesariamente con el contenido de silicio, como se suele pensar. Las escorias, por ejemplo, presentan porcentajes de silicio por debajo del 30%, lo cual es

muy bajo en comparación con los demás materiales. Sin embargo, pueden ser más amorfos que los cerámicos, los cuales tienen porcentajes de silicio mayores al 60%. Lo mismo sucede con el catalizador CH, el cual, debido a una diferencia en el alto contenido de zeolita y (SiO_2), posee casi un 40% menos de amorfismo que el CA.

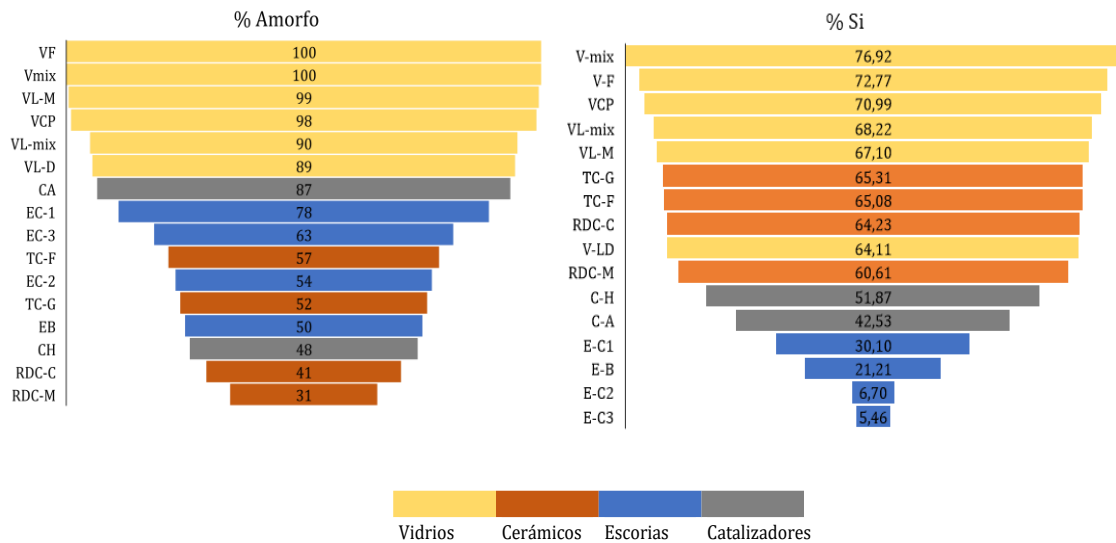


Figura 14. Comparación entre porcentaje amorfo de los residuos y porcentaje de silicio amorfo. De esta manera, en este apartado se definen los siguientes residuos como aptos para la siguiente fase, modificando la Tabla 22 y tomando como base los análisis de DRX en especial el contenido amorfo.

Tabla 23. Subproductos recomendados para la activación teniendo en cuenta los resultados de la FRX y DRX.

Grupo	Característica	Nombre	Subproductos	Material asemejado	Homogeneidad según origen	Amorfo
I	Elevado Si >50%	Vidrios Lodos de vidrio	V-C+P, VL-mix	Humo de sílice	Muy homogéneo	Mayor de todos los materiales 98%
II	Bajo Si <30%	Escorias	EC1	Cenizas volantes o cemento portland	Poco homogéneo*	Mayor de todas las escorias 78%
III	Sin CaO y Alto Al	Catalizadores	CA	Metacaolín	alta	Mayor de los catalizadores 87 %
IV	Contenido diverso	Cerámicos	RDC-C y TC-F	Entre humo de sílice y Cenizas volantes	Media**	Mayor de los cerámicos 41-57 %

* Entre las escorias de cobre principalmente
 ** Con variaciones en los componentes minoritarios.

Cabe aclarar que el material totalmente amorfo no necesariamente presenta reactividad hidráulica y/o puzolánica, aunque muchos autores la relacionan con ella. Por otro lado, la reactividad (sobre todo a edades tempranas) depende mucho de las

propiedades texturales, como puede ser la superficie BET y la distribución de tamaños de partículas.

RMN

El RMN permitió mediante las deconvoluciones, identificar estructuras en las que se encuentra configurado el Si o Al, y cuantificar los porcentajes de dichas estructuras en las muestras. La configuración se refiere al número de enlaces que puede tener un elemento estudiado. Cuanto mayor es el número de enlaces que están formando los elementos estudiados, mayor es el grado de polimerización. Para el caso del silicio, los grados de polimerización son 0, 1, 2, 3 y 4, y para el aluminio IV, V y VI. Cuando el grado de polimerización no es el máximo, significa que existe uno o varios lugares que pueden ser ocupados por nuevos compuestos. Por lo tanto, cuanto mayor sea el porcentaje no polimerizado, se espera una mayor disposición a la reactividad del material.

Análisis de resultados

En el Anejo 4 se encuentra el análisis llevado a cabo para la interpretación de los datos del RMN. En la Tabla 24 se encuentran los valores de Al y Si no-polimerizados para las muestras, la Figura 15 es una representación de la tabla, y en el Anejo 3 se encuentran en detalle las estructuras detectadas para cada material, con los porcentajes de las deconvoluciones.

Tabla 24. Resultados resumidos de los porcentajes obtenidos de la RMN.

Muestra	Si (no-polimerizado)	Al (no-polimerizado)	Muestra	Si (no-polimerizado)	Al (no-polimerizado)
<i>VL-mix</i>	77.2	90,05	<i>TC-G</i>	61.2	82,73
<i>VL-M</i>	0	74,95	<i>TC-F</i>	96	79,74
<i>VL-D</i>	12,65	91,58	<i>C-A</i>	27.3	73,29
<i>V-F</i>	11,46	99,99	<i>C-H</i>	0	69,25
<i>V-mix</i>	0	100	<i>EB</i>	100	52,21
<i>V-C+P</i>	71.3	100	<i>EC-1</i>	No medible	No medible
<i>RDC-C</i>	68.5	88,37	<i>EC-2</i>	89.5	94,51
<i>RDC-M</i>	83.5	91,76	<i>EC-3</i>	No medible	87,75
Interpretación: [6] para ²⁹ Si y [5] para ²⁷ Al					

En general, todos los materiales presentan poco aluminio totalmente polimerizado (Al(VI)), y estructuras de silicio con variaciones en el grado de polimerización. Esto es un primer indicativo de que, en general, el aluminio, aunque se encuentra en menor porcentaje en la mayoría de los residuos estudiados, es muy reactivo.

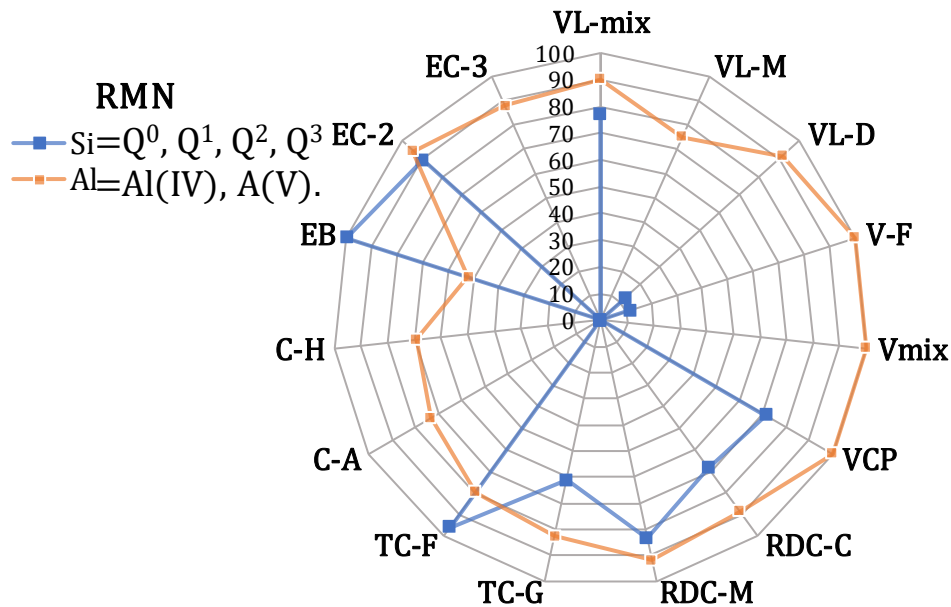


Figura 15. Resultados de RMN para cada uno de los residuos. Porcentaje de Si reactivo (Q0, Q1, Q2 y Q3), y porcentaje de Al reactivo (Al(IV), A(V)). EC-1 no pudo ser medido por el alto contenido de Fe.

En cuanto al porcentaje de silicio no polimerizado, se observa una variación significativa en las muestras. La muestra EB muestra el mayor porcentaje de silicio no polimerizado con un 100%, seguida por VL-mix y V-C+P con un 77 y un 71.3%. Por otro lado, EC-2 muestra un 89.5% de silicio no polimerizado. La EC-3 no pudo ser medida por su alto contenido de hierro. Estos resultados sugieren que las muestras de vidrio, y escorias presentan una presencia notable de silicio en una forma no polimerizada, lo que podría indicar reactividad en estas muestras.

En cuanto al porcentaje de aluminio no polimerizado, se observan resultados menos variables en la mayoría de las muestras con rangos entre alrededor del 80%. La muestra VL-M muestra un 74.95% de aluminio no polimerizado, seguida por VL-D con un 91.58% y RDC-M con un 91.76%. Estos resultados indican una presencia significativa de aluminio en una forma no polimerizada en estas muestras. Sin embargo, EB muestra el porcentaje más bajo de aluminio no polimerizado con un 52.21%, lo que sugiere una menor presencia de aluminio en una forma no polimerizada en esta muestra en particular.

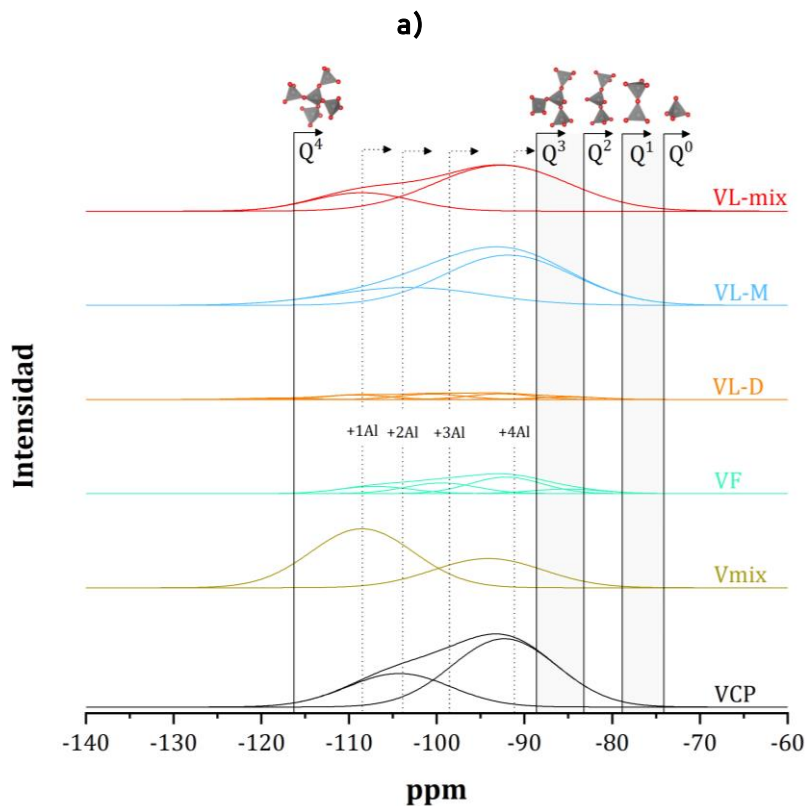
Estos resultados brindan información importante sobre las estructuras químicas de las diferentes muestras. Sin embargo, se requiere un análisis adicional para comprender

completamente el significado y las implicaciones de estos resultados en el contexto de los materiales estudiados.

A continuación, se presenta el análisis con la deconvolución de los espectros RMN.

Grupo I: Vidrios

De acuerdo con los resultados del ^{29}Si NMR del material V-C+P en la Figura 16a, se puede observar que los lodos de vidrio y el vidrio de lámparas fluorescentes presentan picos en la zona de Q^4+3Al o Q^4+4Al , muy cerca de la zona Q^3 , y la mezcla de vidrios presenta más picos en la zona Q^4+Al . Esto significa que, para este último material, los principales enlaces del silicio no se dan principalmente con aluminio y que se encuentra probablemente más polimerizado. En general, se encuentra que los lodos de vidrio de depuradora (VL-D) indican una menor reactividad. El VL-mix presenta mayor similitud con el VL-D, y dado que el VL-mix es la mezcla de VL-M y VL-D, es probable que el segundo esté en una mayor proporción.



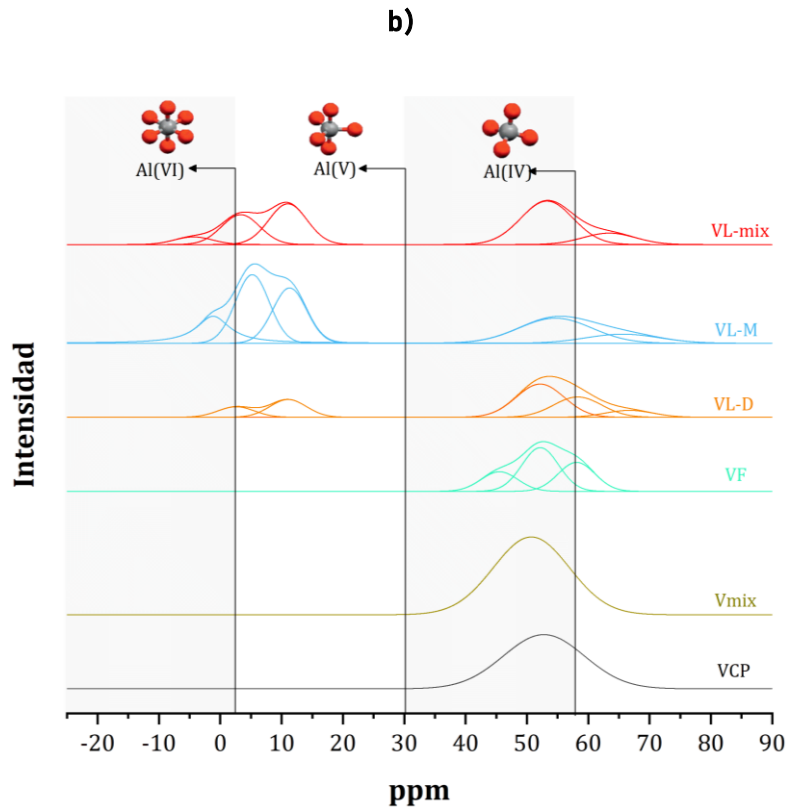


Figura 16. Deconvoluciones de RMN para vidrios. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al .

En la Figura 16 b se puede observar que las especies de aluminio son principalmente Al(IV), y que los lodos de vidrio difieren de los demás vidrios al presentar estructuras Al(VI), lo que implica menos enlaces libres y más dificultad de reagrupación, lo que podría traducirse en menos reactividad. El análisis de las diferentes deconvoluciones de los espectros ^{27}Al del RMN del V-C+P, Vmix y VF muestran que ningún aluminio corresponde a Al(VI), lo cual es beneficioso debido a que la presencia de una fracción importante de Al(VI) puede afectar considerablemente la disolución de los vidrios [71].

Grupo II: Escorias

En la Figura 17a se aprecia que la escoria de acero EB prácticamente no presenta especies de Si polymerizadas, únicamente contiene estructuras Q^0 y Q^1 , lo que significa que todo el Si se encuentra sin enlazar y podría ser reactivo. En la parte b de la Figura 17, podemos encontrar que, para la EB, el Al cuenta con enlaces libres tipo Al(IV) y Al(V), y corresponde a un 52%, el porcentaje más bajo de todos los materiales, y puede ser debido a la Corsidierita ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) encontrada en la DRX. La escoria de cobre EC-1 no pudo ser medida en el ^{29}Si NMR debido a que, para este ensayo, los materiales no deben contener material de atracción magnética, y dicha muestra presenta un 59%

equivalente de Fe_2O_3 (ver Anejo 1).). La EC-2 contiene un pequeño porcentaje de silicio no polimerizado, como se aprecia en la tercera banda de deconvolución de la Figura 17 b, y tiene casi todo su aluminio no polimerizado al igual que la EC-3.

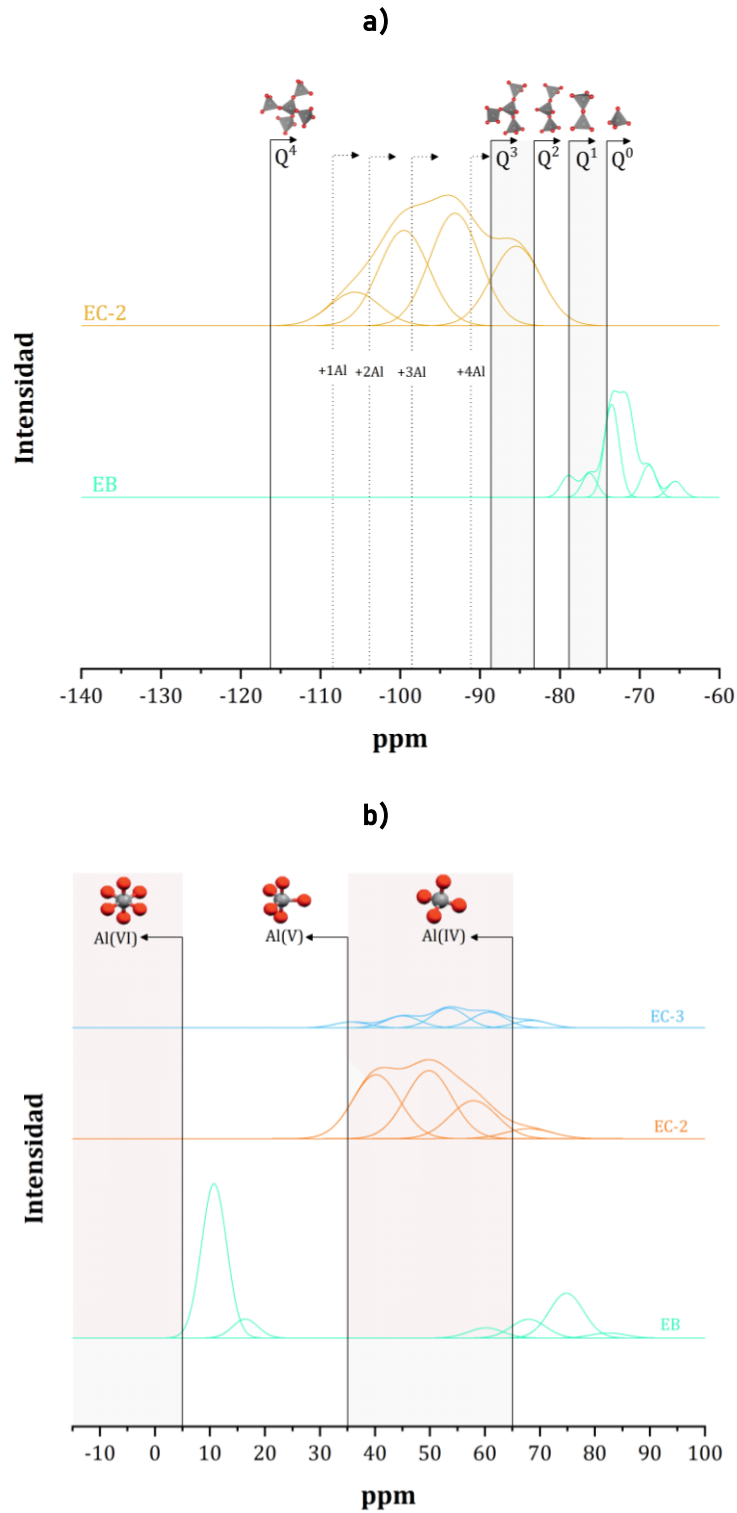
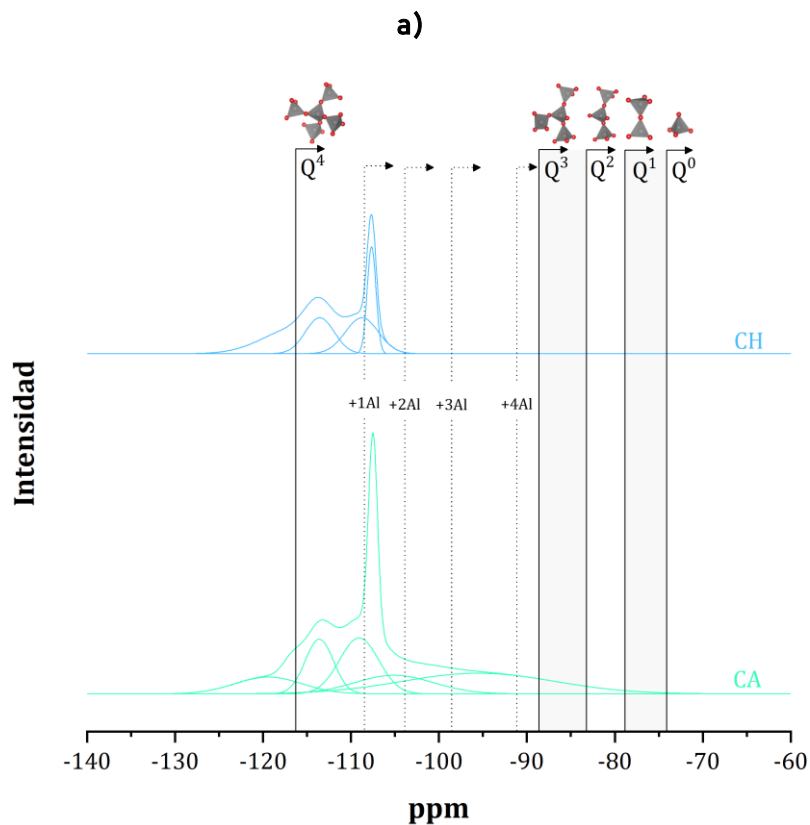


Figura 17. Deconvoluciones de RMN para escorias. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al .

Grupo III: Catalizadores

En los catalizadores, los resultados del RMN son casi idénticos. Presentan un 98% de Al tipo IV o V, lo que significa que tienen puntos de enlace libres, lo cual es considerable debido a que este material está constituido principalmente por aluminio. Sin embargo, en cuanto al Si, este se encuentra en ambos casos totalmente polimerizado, teniendo únicamente estructuras Q^4 , lo cual concuerda con las altas proporciones de Zeolita, Mullita y Silicalita halladas en el DRX. Esto significa que el silicio se encuentra enlazado y difícilmente sería reactivo. El CA es más amorfo que el CH, lo que puede explicar que tenga más estructuras tipo Q^4+3Al (dos deconvoluciones más a la derecha que para CH), que son las que se encuentran en transición hacia un nivel de polimerización menor.



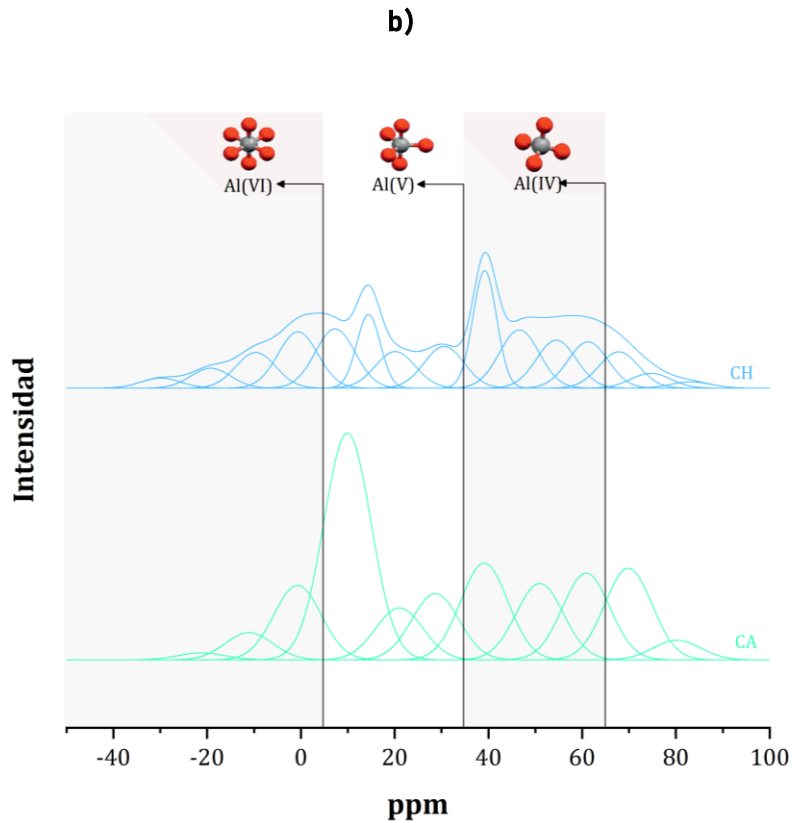


Figura 18. Deconvoluciones de RMN para catalizadores. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al .

Grupo IV: Cerámicos

La muestra RDC-M presenta el triple de silicio no-polimerizado con respecto a los demás cerámicos, esto se puede apreciar en la Figura 19a con picos más a la derecha, que reflejan las estructuras Q^1 , Q^2 y Q^3 . De manera individual, las muestras de RDC contienen un 93% de silicio polimerizado y un contenido variable de estructuras tipo Q^2 . Para el caso de la RDC-M, dichas especies representan aproximadamente el 32.64%, mientras que para el RDC-C, alrededor del 7%. Las especies detectadas en el ^{27}Al muestran que un 98% del Al es de tipo Al(IV) o Al(V), lo que significa que la mayor parte de este Al puede ser reactivo. La muestra TC está formada por Si que no se encuentra totalmente polimerizado, teniendo un 8.41% de estructuras Q^2 , lo que significa que podría ser reactivo. El ^{27}Al del análisis muestra que el 80% de los Al es IV o V, lo que significa que la mayor parte de este Al puede ser reactivo.

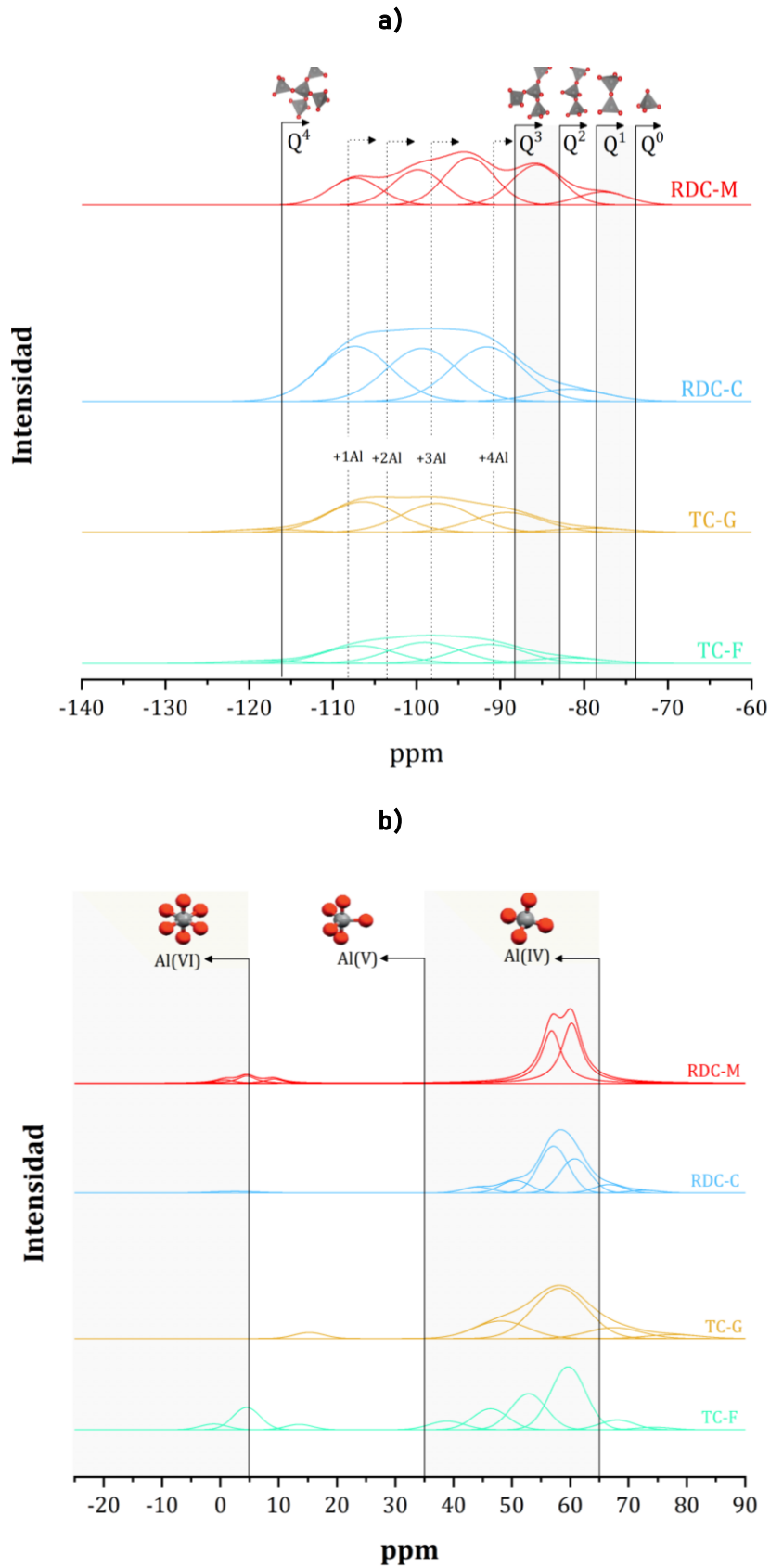
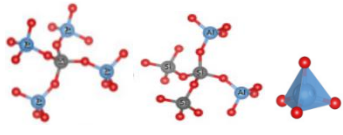
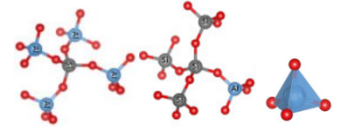
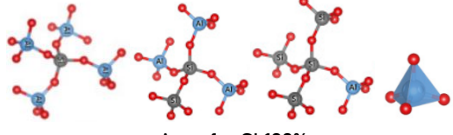
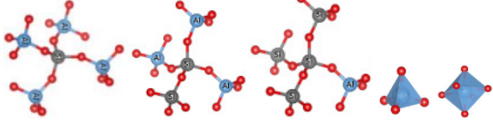
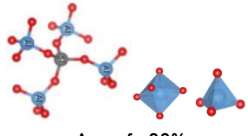
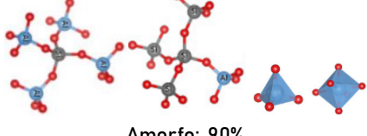
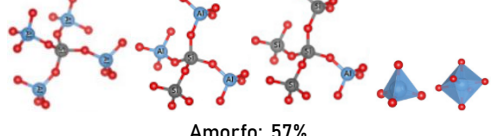
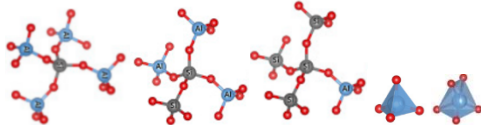
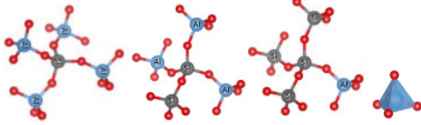
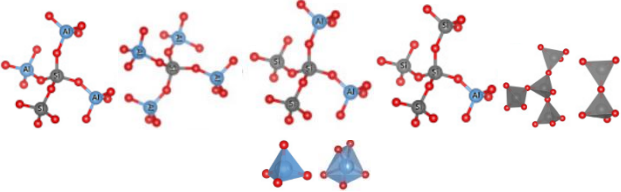
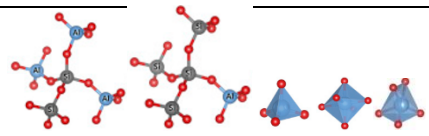
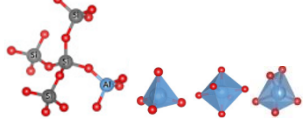
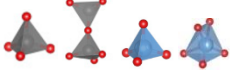
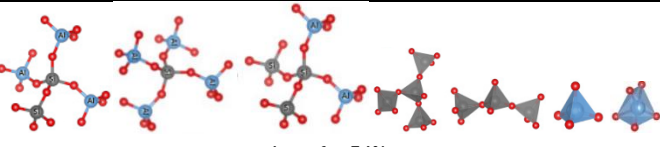
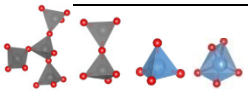


Figura 19. Deconvoluciones de RMN para cerámicos. a) ^{29}Si y b) ^{27}Al .

A continuación, se presentan las estructuras de los compuestos principales de los materiales, que sintetizan los hallazgos relevantes de la caracterización química.

Tabla 25. Características de la estructura química de los materiales.

Material	²⁹ Si	²⁷ Al	Estructura
V-C+P	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +2Al	Al(IV)	 <p>Amorfo: 98% Cristalino: Principalmente en compuestos de Si (Cuarzo, coesita)</p>
V-mix	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +1Al	Al(IV)	 <p>Amorfo: 100% Cristalino: 0</p>
V-F	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +3Al Q ⁴ +1Al	Al(IV)	 <p>Amorfo: Si 100% Cristalino: 0</p>
VL-D	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +3Al Q ⁴ +1Al	Al(IV) Al(VI)	 <p>Amorfo: 89% Cristalino: Principalmente en compuestos de Ca.</p>
VL-M	Q ⁴ +4Al	Al(VI) Al(IV)	 <p>Amorfo: 99% Cristalino: Únicamente en compuestos de Mg (periclasa).</p>
VL-mix	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +1Al	Al(IV) Al(VI)	 <p>Amorfo: 90% Cristalino: Principalmente en compuestos de Ca (Calcita y aragonita)</p>
TC-F	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +3Al Q ⁴ +1Al	Al(IV) Al(VI)	 <p>Amorfo: 57% Cristalino: Principalmente Si, Na y Al (Cuarzo, Ilita y Albita).</p>

<i>TC-G</i>	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +3Al Q ⁴ +1Al	Al(IV) Al(V)	 <p>Amorfo: 52% Cristalino: Principalmente Si, Ca, S y Al (Cuarzo, anortita, ortoclasa).</p>
<i>RDC-C</i>	Q ⁴ +4Al Q ⁴ +3Al Q ⁴ +1Al	Al(IV)	 <p>Amorfo: 41% Cristalino: Principalmente Ca (Calcita Ilita y albita).</p>
<i>RDC-M</i>	Q ⁴ +3Al Q ⁴ +4Al Q ⁴ +2Al Q ⁴ +1Al Q ³ Q ¹	Al(IV) Al(VI)	 <p>Amorfo: 31% Cristalino: Principalmente Si, Ca, Na y Al (Cuarzo calcita y albita).</p>
<i>CA</i>	Q ⁴ +3Al Q ⁴ +1Al	Al(VI) Al(IV) Al(V)	 <p>Amorfo: 87% principalmente en compuestos de Al Cristalino: Principalmente Si (zeolita y).</p>
<i>CH</i>	Q ⁴ +1Al	Al(IV) Al(V) Al(VI)	 <p>Amorfo: 48% principalmente en compuestos de Si Cristalino: Principalmente Si y Al (Zeolita mullita 3:2).</p>
<i>EB</i>	Q ⁰ Q ¹	Al(IV) Al(V) Al(VI)	 <p>Amorfo: 50% Cristalino: Principalmente Ca, Mg, Fe (C3S triclinico, Corsdierita, Srebrodolskita).</p>
<i>EC-1</i>	No medible	No medible	<p>Amorfo: 78% Cristalino: Principalmente Fe y Si (fayalita magnesiana).</p>
<i>EC-2</i>	Q ⁴ +3Al Q ⁴ +4Al Q ⁴ +2Al Q ³ Q ²	Al(IV) Al(V)	 <p>Amorfo: 54% Cristalino: Principalmente Cu, Mg, y Ca (Cuprita, Magnesita y Vertumnita).</p>
<i>EC-3</i>	No medible	Al(IV) Al(V)	 <p>Amorfo: 63% Cristalino: Principalmente Cu, Fe, P y Mg (cuprita fosfato de Fe y periclasa).</p>

Sumario

Las muestras EB, VL-mix , V-C+P y EC-2 y TC-F presentan un alto porcentaje de silicio no polimerizado, lo que puede indicar la presencia de compuestos reactivos. Por otro lado, las muestras VL-mix, RDC-C y EC-2 muestran un alto porcentaje de aluminio no polimerizado, mientras que EB presenta el porcentaje más bajo de aluminio no polimerizado.

De esta manera, en este apartado se definen los siguientes residuos como aptos para la siguiente fase, modificando la Tabla 23 y tomando como base los análisis de DRX en especial el contenido amorfo.

Tabla 26. Subproductos recomendados para la activación teniendo en cuenta los resultados de la FRX, DRX y RMN .

Grupo	Característica	Nombre	Subproductos	Material asemejado	Homogeneidad según origen	Amorfo	Si no polimerizado
I	Elevado Si >50%	Vidrios Lodos de vidrio	V-C+P VL-mix	Humo de sílice	Muy homogéneo	Mayor de todos los materiales 98%	V-C+P Alto VL-mix bajo
II	Bajo Si <30%	Escorias	EC-2 EB	Cenizas volantes o cemento portland	Poco homogéneo*	Mayor de todas las escorias 78%	Alto % Si no polimerizado
III	Sin CaO y Alto Al	Catalizadores	CA	Metacaolín	alta	Mayor de los catalizadores 87 %	Bajo
IV	Contenido diverso	Cerámicos	RDC-C TC-F	Entre humo de sílice y Cenizas volantes	Media**	Mayor de los cerámicos 41-57 %	Alto
* Entre las escorias de cobre principalmente ** Con variaciones en los componentes minoritarios.							

De acuerdo a lo anterior los materiales recomendados para la activación son: V-C+P EC-2, EB, CA, RDC-C t TC-F.

3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3

Después del análisis de las diferentes variables económicas y tecnológicas de los subproductos estudiados, se puede establecer lo siguiente:

- Los subproductos generados en España que se ajustan a las características de reactividad según el estado del arte de la activación alcalina son: escorias de zinc, níquel, cobre, acero y plomo; residuo de catalizador de craqueo catalítico; lodo rojo de bauxita; residuos de vidrio (fracción no reciclable) y RDCs cerámicos.
- Entre estos subproductos, los que generan los volúmenes más importantes son los RDCs cerámicos, la escoria de acero y la escoria de cobre.
- De los materiales mencionados, los que presentan mayor dificultad para convertirse en precursores son las escorias de zinc y níquel, debido a que hay reservas pero no existe una generación actual. Además, la escoria de plomo junto con el lodo rojo de bauxita presentan compuestos que ponen en peligro la seguridad ocupacional. Por lo tanto, los materiales con un potencial de uso real son los subproductos de vidrio (fabricación o fracción no reciclable de botellas), subproductos cerámicos (RDC de ladrillo rojo y Testillo cocido), escorias metalúrgicas de acero y cobre, y residuo de catalizador gastado de craqueo catalítico.
- De los subproductos con un potencial de uso real, la escoria de cobre tiene mayores limitaciones tecnológicas debido a que presenta una dureza y un tamaño muy grandes (> 9 cm), lo que requeriría una trituración especial.
- Los subproductos con mayor potencial de activación son la escoria de acero, la fracción de vidrio no reciclable de contenedor y los RDCs cerámicos.
- Las escorias de acero requerirían un menor procesamiento para su acondicionamiento debido a su baja humedad, y su tamaño de partícula ya es muy fino desde su generación. El V-C+P y los cerámicos tendrían que pasar por un proceso de molienda a gran escala. Superada la fase de acondicionamiento estos materiales presentan estructuras químicas típicas de precursores para MAA, y sus volúmenes de generación permitirían una producción constante para elementos prefabricados para construcción.
- El contenido amorfo de los materiales no está necesariamente relacionado con el contenido de silicio, como suele pensarse. Por ejemplo, las escorias tienen

porcentajes de silicio por debajo del 30%, Sin embargo, pueden ser más amorfos que los cerámicos, que tienen porcentajes de silicio superiores al 60%.

- Los subproductos de vidrio, escorias de acero, residuo de catalizador de craqueo catalítico y cerámicos contienen, respectivamente, altos contenidos de silicio, calcio, aluminio e híbridos con porcentajes amorfos de los mismos. Estas características permitirían su activación en condiciones específicas, así como su combinación para mejorar las condiciones de curado y el rendimiento mecánico.
- Delos 16 subproductos caracterizados experimentalmente los materiales recomendados para la activación son: V-C+P, EC-2, EB, CA, RDC-C y TC-F.

3.6 ANEJOS DEL CAPÍTULO 3

3.6.1 Anejo 1. Resultados FRX.

VL-mix			VL-M			VL-D			VF		
Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI
SiO2	58,72	68,22	SiO2	64,12	67,10	SiO2	52,85	64,11	SiO2	72,44	72,77
Na2O	10,72	12,45	Na2O	11,84	12,39	Na2O	9,97	12,09	Na2O	15,7	15,77
CaO	7,52	8,74	CaO	8,21	8,59	CaO	8,87	10,76	CaO	4,27	4,29
MgO	3,84	4,46	Al2O3	5,48	5,73	Al2O3	4,52	5,48	MgO	3,08	3,09
Al2O3	3,78	4,39	MgO	4,3	4,50	MgO	3,58	4,34	Al2O3	2,24	2,25
Fe2O3	0,764	0,89	Fe2O3	0,814	0,85	Fe2O3	1,08	1,31	K2O	0,881	0,88
K2O	0,26	0,30	K2O	0,295	0,31	Cl	0,466	0,57	BaO	0,343	0,34
SO3	0,145	0,17	SO3	0,172	0,18	SO3	0,401	0,49	Fe2O3	0,168	0,17
Cl	0,0876	0,10	Cl	0,145	0,15	K2O	0,201	0,24	SO3	0,0971	0,10
As2O3	0,0871	0,10	TiO2	0,0678	0,07	As2O3	0,178	0,22	As2O3	0,0625	0,06
TiO2	0,0556	0,06	MnO	0,0193	0,02	TiO2	0,0672	0,08	WO3	0,0545	0,05
MnO	0,0172	0,02	PtO2	0,0173	0,02	P	0,0578	0,07	SrO	0,0419	0,04
NiO	0,0128	0,01	NiO	0,0149	0,02	NiO	0,03	0,04	Cl	0,0403	0,04
ZrO2	0,0111	0,01	P2O5	0,0129	0,01	MnO	0,0294	0,04	TiO2	0,0311	0,03
RuO4	0,0101	0,01	ZrO2	0,0107	0,01	ZnO	0,0252	0,03	ZrO2	0,0203	0,02
						RuO4	0,0198	0,02	P	0,0179	0,02
						PdO	0,0168	0,02	NiO	0,015	0,02
						SrO	0,0165	0,02	MnO	0,0113	0,01
						Cr2O3	0,0165	0,02	CuO	0,01	0,01
						PtO2	0,0157	0,02			
						Tb4O7	0,0138	0,02			
LOI	13,92		LOI	4,44		LOI	17,56		LOI	0,45	

V-mix			VCP			RDC-C			RDC-M		
Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI
SiO2	76,65	76,92	SiO2	70,17	68,17	SiO2	63,5	52,31	SiO2	52,94	60,61
Na2O	10,58	10,62	Na2O	12,07	11,73	Al2O3	18,17	14,97	CaO	15,45	17,69
Al2O3	2,91	2,92	CaO	10,02	9,73	Fe2O3	6,16	5,07	Al2O3	9,4	10,76
K2O	2,41	2,42	Al2O3	2,85	2,77	K2O	3,42	2,82	K2O	2,81	3,22
CaO	2,25	2,26	MgO	1,93	1,87	CaO	2	1,65	Fe2O3	2,14	2,45
BaO	1,88	1,89	K2O	0,727	0,71	MgO	1,68	1,38	MgO	1,65	1,89
MgO	1,32	1,32	Fe2O3	0,488	0,47	Na2O	1,41	1,16	Na2O	1,6	1,83
PbO	0,332	0,33	SO3	0,105	0,10	F	0,965	0,80	SO3	0,801	0,92
SrO	0,286	0,29	TiO2	0,102	0,10	TiO2	0,795	0,65	TiO2	0,25	0,29
ZnO	0,25	0,25	PbO	0,0773	0,08	BaO	0,156	0,13	P2O5	0,0645	0,07
Fe2O3	0,184	0,18	Cr2O3	0,0495	0,05	P2O5	0,122	0,10	SrO	0,0476	0,05
Sb2O3	0,138	0,14	ZrO2	0,0387	0,04	MnO	0,078	0,06	MnO	0,0474	0,05
CeO2	0,0917	0,09	ZnO	0,038	0,04	ZrO2	0,0564	0,05	ZrO2	0,033	0,04
ZrO2	0,0812	0,08	SnO2	0,0343	0,03	V2O5	0,0442	0,04	NiO	0,0234	0,03
Cl	0,0778	0,08	Cl	0,0336	0,03	SO3	0,033	0,03	WO3	0,0163	0,02
TiO2	0,0488	0,05	MnO	0,0301	0,03	SrO	0,032	0,03	Cl	0,0155	0,02
WO3	0,0305	0,03	P2O5	0,0268	0,03	PtO2	0,0299	0,02	PtO2	0,0145	0,02
NiO	0,0295	0,03	SrO	0,018	0,02	NiO	0,0265	0,02	ZnO	0,0123	0,01
S	0,0264	0,03	NiO	0,0162	0,02	Cr2O3	0,0252	0,02	V2O5	0,0094	0,01
P2O5	0,0157	0,02				Tb4O7	0,0224	0,02	RuO4	0,0071	0,01
MnO	0,0126	0,01				CeO2	0,0222	0,02	Cr2O3	0,0049	0,01
Y2O3	0,0111	0,01				WO3	0,0201	0,02	MoO3	0,0047	0,01
Ar	0,0109	0,01				ZnO	0,0181	0,01			
PtO2	0,0105	0,01				Rb2O	0,0143	0,01			
						Nd2O3	0,0124	0,01			
						Cl	0,0111	0,01			
						Co3O4	0,0111	0,01			
						RuO4	0,0103	0,01			
LOI	0,35		LOI	1,16		LOI	1,13		LOI	12,66	

ACTIVACIÓN ALCALINA DE RESIDUOS URBANOS E INDUSTRIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PIEZAS PREFABRICADAS

TC-G			TC-F			C-A			C-H		
Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI
SiO2	64,7	65,31	SiO2	62,89	65,08	Al2O3	52,22	52,77	SiO2	51,61	51,87
Al2O3	19,37	19,55	Al2O3	17,12	17,72	SiO2	42,09	42,53	Al2O3	40,7	40,90
CaO	3,95	3,99	CaO	4,78	4,95	La2O3	1,28	1,29	P2O5	3,08	3,10
Fe2O3	3,62	3,65	Na2O	2,7	2,79	P2O5	0,915	0,92	TiO2	1,43	1,44
K2O	2,54	2,56	Fe2O3	2,63	2,72	TiO2	0,805	0,81	Fe2O3	0,803	0,81
Na2O	1,61	1,63	K2O	2,17	2,25	Na2O	0,481	0,49	La2O3	0,783	0,79
MgO	1,44	1,45	MgO	1,26	1,30	Fe2O3	0,463	0,47	Na2O	0,36	0,36
TiO2	0,657	0,66	ZrO2	1,17	1,21	NiO	0,149	0,15	MgO	0,163	0,16
ZrO2	0,542	0,55	TiO2	0,638	0,66	MgO	0,132	0,13	NiO	0,153	0,15
ZnO	0,213	0,22	ZnO	0,462	0,48	V2O5	0,104	0,11	V2O5	0,0753	0,08
SO3	0,0687	0,07	BaO	0,195	0,20	SO3	0,0997	0,10	CaO	0,0694	0,07
P	0,0624	0,06	SO3	0,141	0,15	Cl	0,0742	0,07	Cl	0,0593	0,06
WO3	0,0426	0,04	P2O5	0,137	0,14	K2O	0,0314	0,03	SO3	0,0445	0,04
MnO	0,0377	0,04	Cr2O3	0,0533	0,06	CaO	0,0197	0,02	K2O	0,0384	0,04
Cl	0,0345	0,03	SrO	0,0441	0,05	Co3O4	0,017	0,02	ZrO2	0,0301	0,03
Cr2O3	0,0295	0,03	PbO	0,0355	0,04	ZrO2	0,0167	0,02	Co3O4	0,0168	0,02
SrO	0,0236	0,02	NiO	0,0298	0,03	WO3	0,0124	0,01	Cr2O3	0,0152	0,02
NiO	0,0188	0,02	WO3	0,0277	0,03	ZnO	0,0104	0,01	CeO2	0,0131	0,01
V2O5	0,0166	0,02	MnO	0,0255	0,03						
Sm2O3	0,0131	0,01	V2O5	0,0212	0,02						
Co3O4	0,0127	0,01	PtO2	0,0186	0,02						
PbO	0,0124	0,01	CuO	0,0161	0,02						
PtO2	0,0104	0,01	Y2O3	0,0142	0,01						
			Cl	0,0129	0,01						
			RuO4	0,0129	0,01						
			PdO	0,0105	0,01						
			Nd2O3	0,0102	0,01						
LOI	0,94		LOI	3,36		LOI	1,04		LOI	0,5	

EB			EC-1			EC-2			EC-3		
Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI	Oxido	%	% sin LOI
CaO	47,81	51,00	Fe2O3	58,84	58,84	P2O5	27,37	23,66	CuO	26,59	23,43
SiO2	19,88	21,21	SiO2	30,1	30,10	CuO	23,66	20,45	P2O5	23,43	20,65
Fe2O3	8,44	9,00	Al2O3	2,78	2,78	Al2O3	11,56	9,99	Na2O	11,71	10,32
Al2O3	6,19	6,60	ZnO	2,08	2,08	Na2O	9,02	7,80	Fe2O3	10,45	9,21
MgO	6,17	6,58	CuO	1,3	1,30	Fe2O3	8,37	7,24	Al2O3	10,42	9,18
SO3	1,84	1,96	CaO	1,2	1,20	SiO2	6,7	5,79	SiO2	5,46	4,81
MnO	1,22	1,30	SO3	0,905	0,91	ZnO	3,45	2,98	ZnO	4,17	3,67
TiO2	0,459	0,49	MgO	0,712	0,71	CaO	3,36	2,90	CaO	2,76	2,43
Cr2O3	0,28	0,30	K2O	0,525	0,53	MgO	2,66	2,30	MgO	1,25	1,10
Cl	0,0799	0,09	PbO	0,506	0,51	PbO	1,39	1,20	PbO	0,952	0,84
SrO	0,0634	0,07	MoO3	0,424	0,42	SnO2	0,591	0,51	Cr2O3	0,834	0,73
P2O5	0,0592	0,06	TiO2	0,192	0,19	BaO	0,497	0,43	SnO2	0,652	0,57
ZrO2	0,0389	0,04	BaO	0,104	0,10	Cr2O3	0,453	0,39	MnO	0,294	0,26
ZnO	0,0345	0,04	Co3O4	0,0584	0,06	TiO2	0,222	0,19	BaO	0,226	0,20
NiO	0,0277	0,03	MnO	0,0535	0,05	NiO	0,157	0,14	TiO2	0,21	0,19
Na2O	0,0256	0,03	P2O5	0,0442	0,04	MnO	0,137	0,12	NiO	0,178	0,16
CuO	0,0221	0,02	Tb4O7	0,0418	0,04	K2O	0,136	0,12	K2O	0,119	0,10
V2O5	0,0196	0,02	Cr2O3	0,0383	0,04	ZrO2	0,114	0,10	ZrO2	0,096	0,08
K2O	0,0157	0,02	SnO2	0,0216	0,02	Cl	0,0375	0,03	Cl	0,066	0,06
PtO2	0,0119	0,01	Cl	0,0212	0,02	RuO4	0,0219	0,02	MoO3	0,0247	0,02
			NiO	0,0211	0,02	Rh2O3	0,0213	0,02	Rh2O3	0,0234	0,02
						SrO	0,0196	0,02	RuO4	0,0224	0,02
						MoO3	0,0191	0,02	PdO	0,0167	0,01
						PdO	0,0165	0,01	Co3O4	0,0161	0,01
						Co3O4	0,0149	0,01	SrO	0,0151	0,01
LOI	6,18		LOI	0		LOI	0		LOI	0	

3.6.2 Anejo 2. Resultados DRX.

EB			EC-1		
Amorfo		50	Amorfo		78
<i>Calcita</i>	CaCO ₃	2,4	<i>silicato de hierro</i>	Fe ₂ (SiO ₃) ₃	2,7
<i>C2S gamma</i>	2CaO SiO ₂	0,1	<i>fayalita magnesiana</i>	Fe ₂ SiO ₄	19
<i>Portlandita</i>	Ca(OH) ₂	1,8	EC-2		
<i>C3S triclinico</i>	3CaO SiO ₂	5,6	Amorfo		54
<i>Periclasa</i>	MgO	3,6	<i>Cuarzo</i>	SiO ₂	0,9
<i>C2S Alpha 'L</i>	2CaO SiO ₂	3,2	<i>Cuarzo HP</i>	SiO ₂	1
<i>Magnetita</i>	Fe ₂ +Fe ₂ O ₃	1,1	<i>Akermanita</i>	Ca ₂ Mg(Si ₂ O ₇)	2,2
<i>Corsdierita</i>	(Mg,Fe) ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	3,7	<i>Periclasa</i>	MgO	3
<i>peligorskita</i>	(Mg ₂ Al ₂)Si ₈ O ₂₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	0,6	<i>Siderita</i>	FeCO ₃	1,2
<i>Dolomita</i>	CaMg(CO ₃) ₂	0,8	<i>cuprita</i>	Cu ₂ O	14,7
<i>Akermanita</i>	Ca ₂ Mg(Si ₂ O ₇)	2	<i>cuproespinela</i>	Cu(2+) ₂ Fe ₂ (3+) ₄ O ₄	2,7
<i>Srebrodolskita</i>	Ca ₂ Fe ₂₃ O ₅	4,3	<i>MgFe₂O₄ Espinela</i>	MgFe ₂ O ₄	1,9
<i>Doyleita</i>	Al(OH) ₃	1	<i>Magnesioferrita</i>	Mg(Fe ₃₊) ₂ O ₄	0,1
C-A			<i>Magnesita</i>	MgCO ₃	12,4
Amorfo		87	<i>romarchita</i>	SnO	0,3
<i>Zeolita y</i>	SiO ₄	10,9	<i>Vertumnita</i>	Ca ₄ Al ₄ Si ₄ O ₆ (OH) ₂₄ ·3H ₂ O	5,9
<i>Silicalita</i>	SiO ₂	1,8	EC-3		
<i>Anatasa</i>	TiO ₂	0,6	Amorfo		63
CH			<i>Cuarzo</i>	SiO ₂	2,2
Amorfo		48	<i>Cuarzo HP</i>	SiO ₂	0,6
<i>Zeolita y</i>	SiO ₄	15,6	<i>Periclasa</i>	MgO	4,2
<i>Silicalita</i>	SiO ₂	4,8	<i>cuprita</i>	Cu ₂ O	12,8
<i>Anatasa</i>	TiO ₂	1,1	<i>CuCrFeO₄ espinela</i>	CuCrFeO ₄	6
<i>corindon</i>	SiO ₂	1,8	<i>Hematita</i>	Fe ₂ O ₃	2
<i>Mullita</i>	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	2,5	<i>spertinita</i>	Cu(OH) ₂	1,1
<i>Mullita 3:2</i>	3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂	27,1	<i>Siderita</i>	FeCO ₃	1,2
			<i>fosfato de hierro</i>	FePO ₄ (H ₂ O) ₂	5,5
			<i>calcita</i>	CaCO ₃	2,2

RDC-M			TC-G		
Amorfo		31	Amorfo		52
<i>cuarzo</i>	SiO ₂	28,2	<i>cuarzo</i>	SiO ₂	29,5
<i>Calcita</i>	CaCO ₃	11,8	<i>Rutilo</i>	TiO ₂	0,1
<i>Rutilo</i>	TiO ₂	0,2	<i>Ilita</i>	(K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀	2,3
<i>Ilita</i>	(K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀	4,4	<i>albita</i>	NaAlSi ₃ O ₈	3,4
<i>albita</i>	NaAlSi ₃ O ₈	10,7	<i>Anortita</i>	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	5,2
<i>Anortita</i>	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	1,6	<i>Hematita</i>	Fe ₂ O ₃	2,6
<i>Ortoclasa</i>	KAlSi ₃ O ₈	7,2	<i>Ortoclasa</i>	KAlSi ₃ O ₈	4,5
<i>Dolomita</i>	CaMg(CO ₃) ₂	5,2	<i>Zircon</i>	ZrSiO ₄	0,4
RDC-C			TC-F		
Amorfo		41	Amorfo		57
<i>Cuarzo</i>	SiO ₂	1,4	<i>cuarzo</i>	SiO ₂	22,4
<i>Calcita</i>	CaCO ₃	39,6	<i>Rutilo</i>	TiO ₂	0,1
<i>Rutilo</i>	TiO ₂	0,9	<i>Ilita</i>	(K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀	6,8
<i>Ilita</i>	(K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀	9,1	<i>albita</i>	NaAlSi ₃ O ₈	6,3
<i>Albita</i>	NaAlSi ₃ O ₈	4,4	<i>Anortita</i>	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	2,6
<i>Anortita</i>	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	0,7	<i>Hematita</i>	Fe ₂ O ₃	1,8
<i>Hematita</i>	Fe ₂ O ₃	3,3	<i>Ortoclasa</i>	KAlSi ₃ O ₈	4,5
VF			VL-mix		
Amorfo		100	Amorfo		90
V-mix			<i>Calcita</i>	CaCO ₃	2,2
Amorfo		100	<i>Aragonita</i>	CaCO ₃	6,1
VCP			<i>Periclasa</i>	MgO	0,2
Amorfo		98	<i>Corindon</i>	Al ₂ O ₃	1,3
VL-D			VL-D		
<i>Cuarzo</i>	SiO ₂	1,4	Amorfo		89
<i>Coesita</i>	SiO ₂	0,8	<i>sillimanita</i>	Al ₂ SiO ₅	0,8
VL-D			halita		
Amorfo		89	<i>calcita</i>	CaCO ₃	8,7
VL-M			VL-M		
<i>sillimanita</i>	Al ₂ SiO ₅	0,8	Amorfo		99
<i>halita</i>	NaCl	0,9	<i>Periclasa</i>	MgO	0,6
<i>calcita</i>	CaCO ₃	8,7			

3.6.3 Anejo 3. Resultados RMN de acuerdo con GAO 2017.

Muestras	²⁹ Si (ppm)	Si especies	%	señales ²⁷ Al (ppm)	Al especies	%	Si (no-polymerizado)	Al (no-polymerizado)
VL-mix	-92,59	Q4(3Al)	77,17	66,86	no definido	9,95	0	90,05
	-108,5	Q4(0Al)	22,83	56,6	Al(IV)	42,85		
				14,34	Al(V)	17,74		
				6,64	Al(V)	29,46		
VL-M	-91,86	Q4(3Al)	70,57	68,67	no definido	8,26	0	74,95
	-103,19	Q4(2Al)	29,43	57,69	Al(IV)	22,81		
				14,34	Al(V)	23,27		
				8,25	Al(V)	28,87		
			1,87	Al(VI)	16,8			
VL-D	-84,91	Q3(1Al)	12,65	69,8	no definido	8,41	12,65	91,58
	-92,7	Q4(3Al)	29,2	61,41	Al(IV)	24,8		
	-100,48	Q4(2Al)	28,23	55,29	Al(IV)	40,47		
	-109,14	Q4(0Al)	23,51	14,19	Al(V)	16,52		
	-118,8	no definido	6,41	5,73	Al(V)	9,79		
VF	-85,17	Q3(1Al)	11,46	61,23	Al(IV)	31,4	11,46	99,99
	-92,07	Q4(3Al)	42,59	55,31	Al(IV)	47,34		
	-99,43	Q4(2Al)	27,42	48,66	Al(IV)	21,25		
	-106,98	Q4(1Al)	18,52					
V-mix-	-94,12	Q4(3Al)	34,65	53,51	Al(IV)	100	0	100
	-108,5	Q4(0Al)	65,35					
VCP	-92,73	Q4(3Al)	71,25	55,81	Al(IV)	100	0	100
	-104,5	Q4(1Al)	28,75	-	no definido			
RDC-C	-81,65	Q2-b	6,99	72,66	no definido	2,32	6,99	88,37
	-91,6	Q4(3Al)	31,18	66,66	no definido	7,42		
	-99,35	Q4(2Al)	30,33	60,8	Al(IV)	30,43		
	-107,34	Q4(1Al)	31,5	57,14	Al(IV)	41,74		
				50,63	Al(IV)	10,94		
				44,14	Al(IV)	5,26		
			2,55	Al(VI)	1,89			
RDC-M	-77,76	Q1-b	7,95	60,25	Al(IV)	47,2	32,64	91,76
	-85,65	Q3(1Al)	24,69	56,83	Al(IV)	41,29		
	-93,68	Q4(3Al)	29,1	9,18	Al(V)	3,27		
	-99,84	Q4(2Al)	21,71	4,53	Al(VI)	5,61		
	-107,33	Q4(1Al)	16,54	0,78	Al(VI)	2,64		
TC-G	-79,04	Q1-b	4,79	77,74	no definido	4,53	4,79	82,73
	-89,16	Q4(4Al)	23,05	67,54	no definido	12,74		
	-97,56	Q4(3Al)	33,34	58,23	Al(IV)	58,37		
	-106,42	Q4(1Al)	35,28	48,17	Al(IV)	20,46		
	-117,79	no definido	3,54	15,26	Al(V)	3,9		
TC-F	-82,05	Q2-b	8,41	74,41	no definido	1,48	8,41	79,74
	-91,33	Q4(3Al)	28,82	68,09	no definido	5,85		
	-98,99	Q4(2Al)	32,01	59,66	Al(IV)	37,87		
	-106,78	Q4(1Al)	26,71	52,89	Al(IV)	21,66		
	-118,12	no definido	4,06	46,36	Al(IV)	12,59		
				38,9	Al(IV)	5,17		
				13,54	Al(V)	2,45		
			4,52	Al(VI)	10,29			
			-1,11	Al(VI)	2,64			
CA	-95,51	Q4(3Al)	27,25	80,26	no definido	2,39	0	73,29
	-105,09	Q4(1Al)	12,67	69,86	no definido	11,11		
	-107,49	Q4(1Al)	14,95	60,87	Al(IV)	10,51		
	-109,07	Q4(0Al)	18,9	50,97	Al(IV)	9,27		
	-113,59	Q4(0Al)	13,29	39,12	Al(IV)	11,73		
	-116,65	no definido	3,25	28,7	Al(V)	8,02		
	-119,37	no definido	9,69	21,03	Al(V)	6,3		
				9,92	Al(V)	27,46		
				-0,7	Al(VI)	9,03		
			-11,02	Al(VI)	3,31			
			-21,18	Al(VI)	0,86			

	-107,66	Q4(1Al)	19,6	83,25	no definido	1,07		
	-108,75	Q4(0Al)	24,79	74,69	no definido	2,54		
	-113,54	Q4(0Al)	21,68	67,85	no definido	6,24		
	-116,32	no definido	33,93	61,27	Al(IV)	7,94		
CH				54,51	Al(IV)	8,24		
				46,26	Al(IV)	9,99		
				39,22	Al(IV)	11,99		
				30,56	Al(V)	7,16	0	69,25
				20,15	Al(V)	6,26		
				14,43	Al(V)	7,51		
				7,32	Al(V)	10,16		
				-0,61	Al(VI)	9,67		
				-9,61	Al(VI)	6,12		
				-19,22	Al(VI)	3,4		
			-29,87	Al(VI)	3,171			
EB	-65,54	Q0	5,8	82,5	no definido	1,9		
	-68,86	Q0	11,57	74,84	no definido	16,9		
	-71,54	Q0	32,82	67,95	no definido	7,07		
	-73,5	Q0	33,42	60,18	Al(IV)	3,82	100,01	52,21
	-76,27	Q1-a	8,67	16,44	Al(V)	5,27		
	-78,93	Q1-b	7,73	10,75	Al(V)	43,12		
			4,98	Al(VI)	21,93			
EC-1	-	-	-	-	Al(VI)	-	0	0
EC-2	-85,46	Q3(1Al)	24,8	68,01	no definido	5,49		
	-93,14	Q4(3Al)	35,04	57,96	Al(IV)	21,08		
	-99,55	Q4(2Al)	29,7	49,81	Al(IV)	37,84	24,8	94,51
	-105,68	Q4(1Al)	10,47	40,24	Al(IV)	35,59		
EC-3				68,44	no definido	12,25		
				60,77	Al(IV)	25,73		
	-	-	-	53,49	Al(IV)	32,71	0	87,75
				45,09	Al(IV)	19,73		
				35,74	Al(IV)	9,58		
	Si No-polimerizado							
	Al No-polimerizado							

3.6.4 Anejo 4. Interpretación de resultados RMN.

Para la interpretación de los picos generados en las deconvoluciones, existen algunas divergencias dependiendo de los autores. Un ejemplo de ello es que, de acuerdo con los resultados del ^{29}Si NMR del material V-C+P (ver Figura 20), con la interpretación de Silva et al. 2011, el pico en la posición 92,73 ppm puede atribuirse a estructuras Q^3 o Q^2 en vidrios [72]. Mientras que, para Gao et al. 2017, en las mismas bandas solo se encuentran estructuras polimerizadas tipo Q^4 [6].

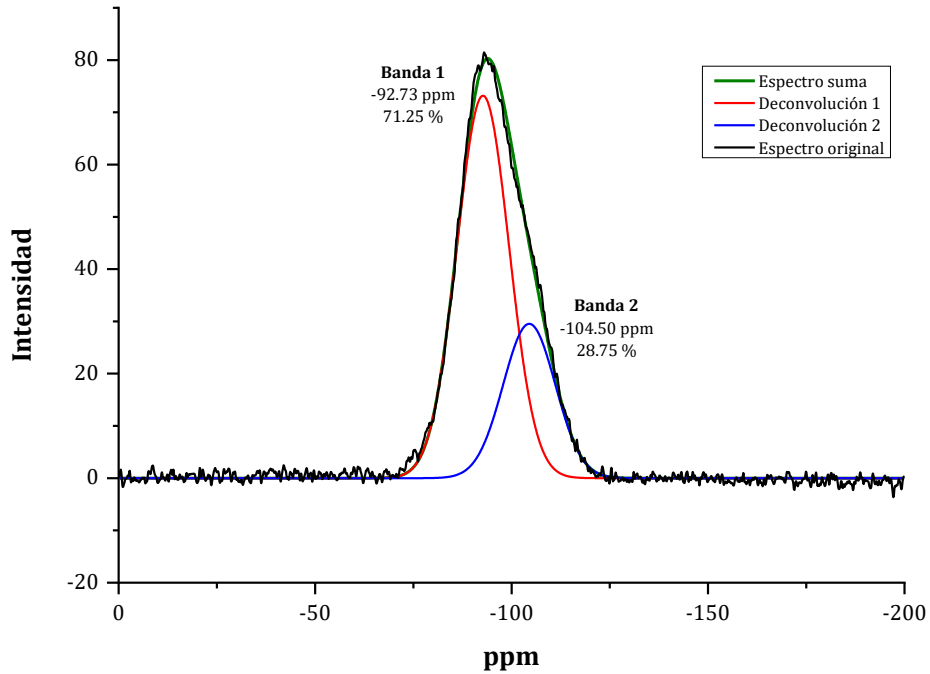


Figura 20. Deconvolución de ^{29}Si RMN para la muestra V-C+P (presente estudio).

Interpretación Gao et al 2017			Interpretación Silva et al 2011		
SEÑAL ppm		ESPECIE	SEÑAL ppm		ESPECIE
INFERIOR	SUPERIOR		INFERIOR	INFERIOR	
-108,00	-116,00	$\text{Q}^4(0\text{Al})$	-105,00	-120,00	Q4
-104,00	-108,00	$\text{Q}^4(1\text{Al})$	-87,00	-102,00	Q3
-98,00	-104,00	$\text{Q}^4(2\text{Al})$	-73,00	-93,00	Q2
-91,00	-98,00	$\text{Q}^4(3\text{Al})$	-60,00	-83,00	Q1
-88,60	-91,00	$\text{Q}^4(4\text{Al})$	0,00	-60,00	Q0
-84,40	-88,60	$\text{Q}^3(1\text{Al})$		-60,00	Q0
-83,10	-84,40	$\text{Q}^2\text{-p}$			
-81,10	-83,10	$\text{Q}^2\text{-b}$			
-79,80	-81,10	$\text{Q}^2(1\text{Al})$			
-77,00	-79,80	$\text{Q}^1\text{-b}$			
-74,00	-77,00	$\text{Q}^1\text{-a}$			
-	-74,00	Q^0			

Tabla 27. Interpretación de datos RMN según Gao et al 2017 [6] y Silva et al 2011 [72].

Si se comparan los datos RMN obtenidos para los residuos con las dos interpretaciones se obtienen los siguientes resultados.

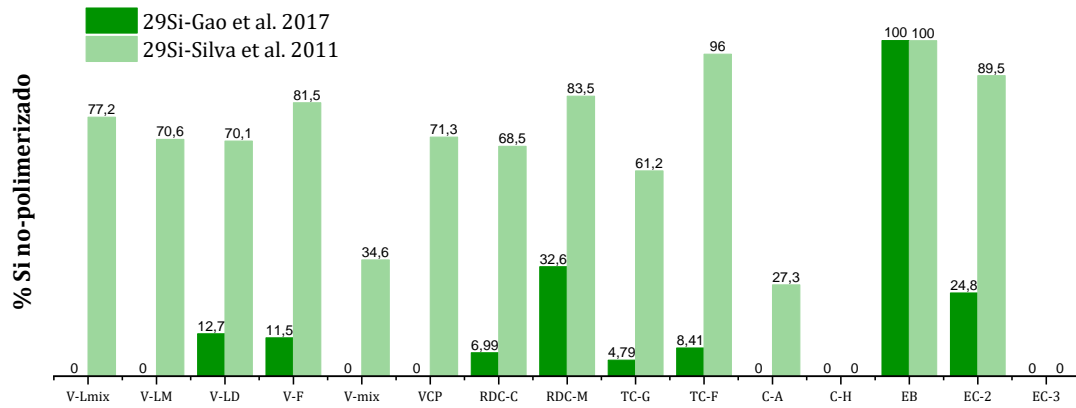
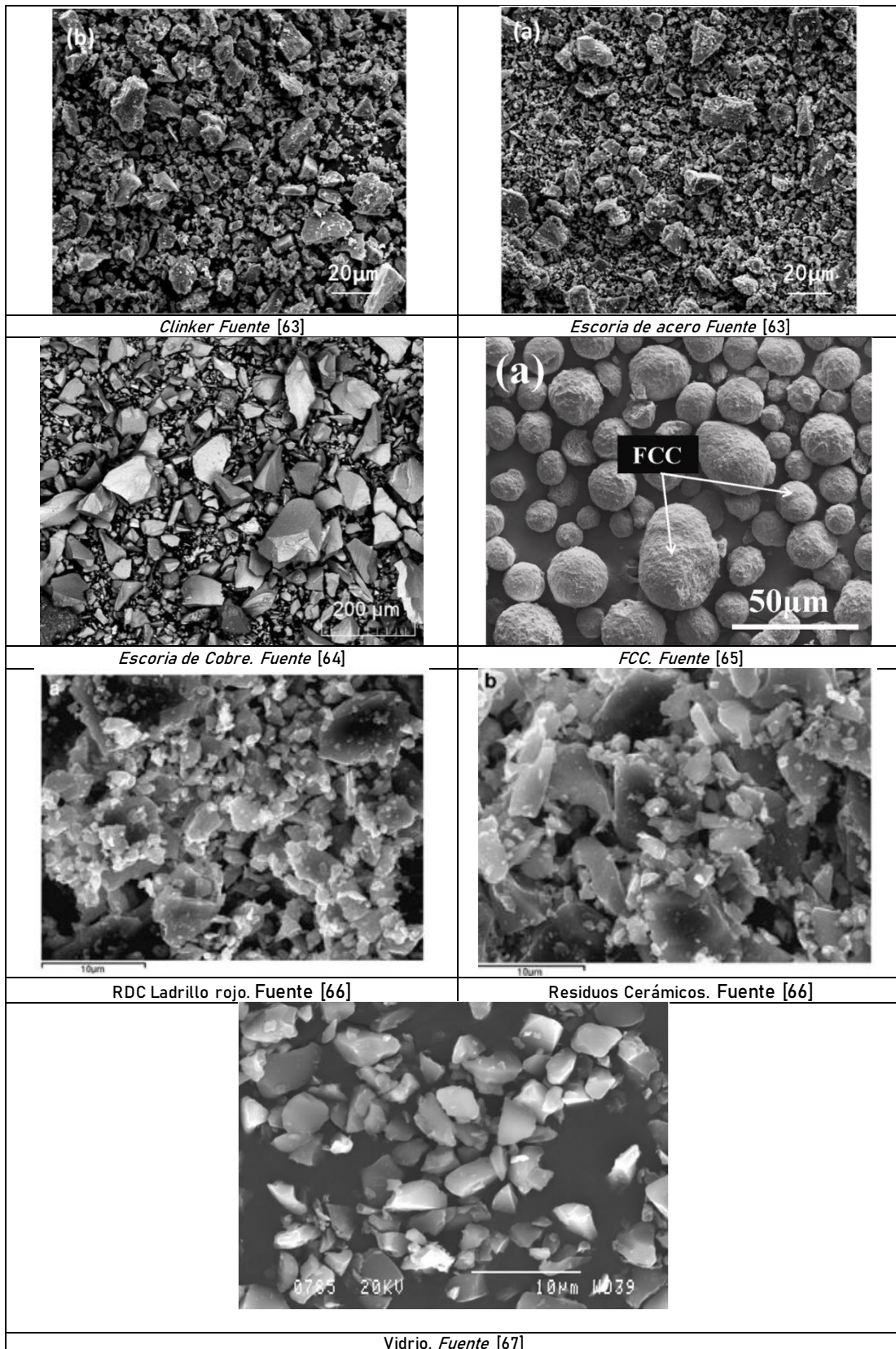


Figura 21. Comparación de las interpretaciones de los ^{29}Si RMN para los autores mencionados en la Tabla 27.

En la Figura 14 se aprecia que las diferencias son muy grandes. Teniendo en cuenta que los valores de Silva et al 2011 se relacionan mas con el porcentaje amorfo y aplicando el mismo criterio para el ^{27}Al RMN, para la presente investigación se trabajó con la interpretación de Silva et al. 2011 [72] y de Eden 2015 [73] para el ^{29}Si y el ^{27}Al respectivamente.

3.6.5 Anejo 5. Aspecto microscópico de los diferentes materiales estudiados.



4 ACTIVACIÓN ALCALINA DE LOS MATERIALES

4.1 RESUMEN DEL CAPÍTULO

La activación alcalina de subproductos industriales es un proceso que puede ser tanto complejo como simple, dependiendo de los diferentes precursores activadores y las condiciones de proceso adoptadas. Por lo tanto, es crucial cuantificar de manera aislada las variables involucradas en el proceso de activación, con el fin de obtener los valores óptimos y lograr un mayor desempeño mecánico.

En este estudio, se realizaron procedimientos de caracterización química y mecánica para evaluar los subproductos con potencial identificados en la fase anterior. Una vez establecidas las variables básicas para la activación, se ajustaron las dosificaciones de cada material con el objetivo de optimizar el proceso y obtener el mejor desempeño mecánico.

Las condiciones de activación encontradas fueron diversas para los diferentes subproductos. Sin embargo, los subproductos de escoria de acero y catalizador no pudieron ser activados, ya que las condiciones favorables para evaluar el conjunto de residuos no resultaron beneficiosas para estos tipos de subproductos.

En cuanto a los demás subproductos, se observó que los valores mínimos de la relación líquido/sólido (L/S) son inferiores a 0,3 en los cerámicos, muy cercanos a 0,3 en los precursores de vidrio y escorias, y superiores a 0,5 en los catalizadores. Bajo las condiciones de estudio (curado térmico de 48 horas a 60°C, 28 días de curado en ambiente "seco"), se encontró que las muestras de vidrio de contenedor mostraron el mejor comportamiento, seguidas por las muestras de Testillo cocido y ladrillo rojo (RDC-TC), mientras que la muestra de lodo de vidrio (VL-mix) presentó un desempeño inferior y retracción.

Los resultados revelan que el curado térmico prolongado a más de 48 horas favorece el desarrollo de resistencia en los precursores cerámicos, pero perjudica a los precursores de vidrio. Asimismo, se determinó que la finura es un parámetro que afecta de manera significativa la resistencia final del material, y se observó que la aplicación de superplastificante es ineficiente para los MAA estudiados.

Bajo las condiciones de activación establecidas, se constató que los precursores de vidrio en matriz de hormigón superan los 25 MPa a los 48 días, mientras que los precursores cerámicos desarrollan su resistencia entre los 28 y los 48 días. Por consiguiente, se seleccionó la fracción no reciclable de vidrio (V-C+P) como el precursor base para la siguiente fase de optimización final y evaluación estructural del prefabricado.

4.2 METODOLOGÍA DEL CAPÍTULO

En esta etapa, se llevaron a cabo experimentos basados en las dosificaciones de pastas y precursores cuyas propiedades resultaron más favorables en el capítulo 3. El objetivo en esta etapa consistió en evaluar diversas condiciones experimentales y diseños de mezcla en matrices de pasta, mortero y hormigón, con el fin de alcanzar un diseño de mezcla que presentara una resistencia superior a los 25 MPa para poder ser implementado como hormigón en elementos estructurales según el código estructural 2021. El diseño de mezcla resultante se estableció como la base para la producción de piezas prefabricadas.

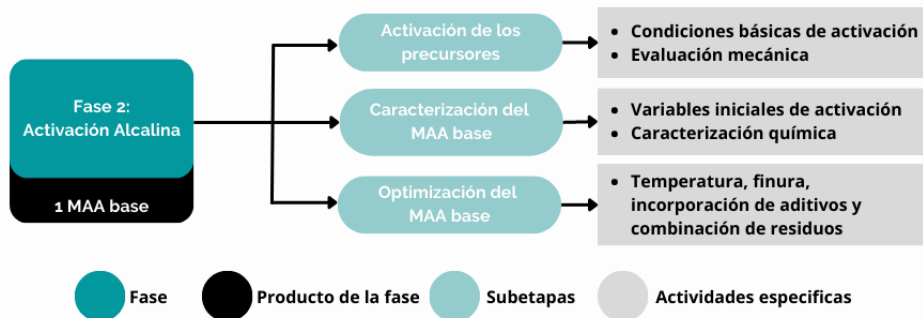


Figura 22. Metodología implementada en la el apartado 4.

Después de acondicionar el material para cada tipo de residuo, el siguiente paso fue la fabricación de pastas utilizando cada material. Mediante procedimientos de caracterización de materiales a diferentes escalas, se logró obtener información preliminar sobre variables como la disolución de los residuos con diferentes concentraciones de activador, las relaciones L/S óptimas, el comportamiento reológico, las resistencias mecánicas de pastas, morteros y hormigones, así como indicios de las dinámicas y compuestos formados durante la activación.

Una vez establecidas las variables básicas para la activación, se ajustaron las dosificaciones para cada material con el objetivo de optimizar el proceso y obtener el

mejor rendimiento mecánico posible. En la Figura 22 se encuentra un esquema de la metodología.

En el desarrollo del capítulo se encontrarán en detalle los ensayos adicionales más específicos requeridos para cada procedimiento.

4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el capítulo 3, se llevaron a cabo estudios de las características individuales de los precursores y se seleccionó un primer grupo para su evaluación en una matriz cementosa (pasta, mortero, hormigón). En concordancia con lo anterior, en esta segunda etapa se realiza una evaluación inicial de 6 materiales (VL-mix, V-C+P, RDCs, EB, TC y CA). Posteriormente, considerando la baja reactividad de las muestras EB y CA bajo las condiciones de activación planificadas, se redujo la cantidad de muestras de 6 a 4 (VL-mix, V-C+P, RDC, TC). Además, teniendo en cuenta su desempeño mecánico, se seleccionó el subproducto V-C+P como precursor final para un estudio más detallado de su comportamiento.

4.3.1 Activación de los precursores

En esta primera parte, se observa el comportamiento de los diferentes precursores al variar las condiciones de activación. Considerando la

4.3.1.1 Molaridad óptima de la solución activadora

Las pastas de cemento Portland requieren únicamente agua para iniciar su consolidación, mientras que los materiales activados alcalinamente necesitan una solución alcalina con una molaridad específica. A diferencia de las pastas con cemento Portland, es necesario determinar el grado óptimo de molaridad de la solución activadora para lograr la máxima disolución del material en cada uno de los precursores estudiados. Para establecer estos parámetros, se sometió cada precursor a soluciones alcalinas de diferentes molaridades.

Procedimiento

El procedimiento consistió en añadir 1 g de cada material precursor en polvo y seco (<0,075 mm de diámetro) a 100 ml de solución NaOH y agitar a 900 rpm a una temperatura de 80°C utilizando un agitador magnético. Se establecieron diferentes soluciones NaOH, como 4M, 6M, 8M, y 12M, para cada precursor. Después de la

agitación, los sólidos remanentes se separaron de las soluciones mediante filtración utilizando un papel microfiltro de 11 μm . El eulato obtenido > acidificó con ácido nítrico al 65% en una solución 1:1, y la solución final se almacenó a baja temperatura en un refrigerador. Las concentraciones de Si y Al se midieron utilizando espectrometría de emisiones ópticas de plasma acoplada en un equipo Perkin Elmer Optima 3200RL inductively (ICP-OES). Este método se basa en investigaciones previas [36][74]

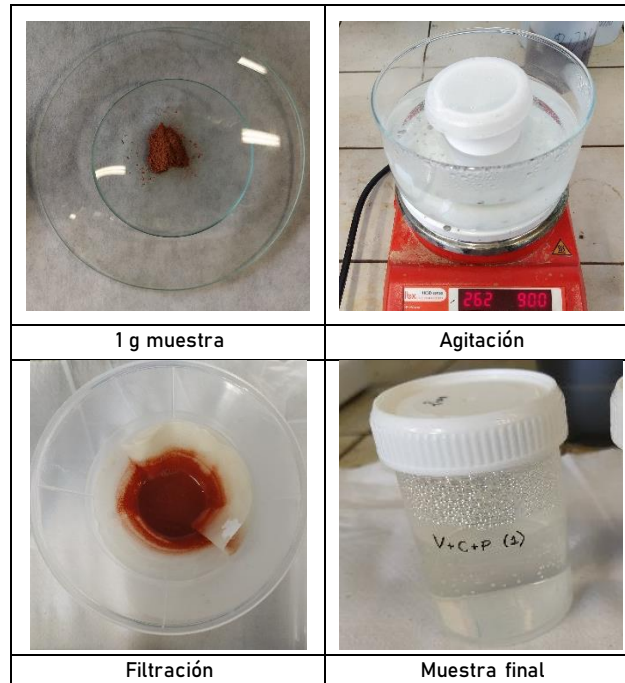


Figura 23. Imágenes del test de ataque alcalino

Resultados

En la Figura 24 se encuentran los datos del silicio disuelto para cada una de las muestras. En ella es posible encontrar diferentes tendencias de solubilidad con el aumento de la molaridad de la solución.

El V-C+P experimenta una disminución en la cantidad de silicio soluble a medida que aumenta la molaridad de las soluciones. La diferencia de material no disuelto entre el ataque con solución 4M y el ataque con solución 8M es del 23%. El vidrio proveniente de los lodos de vidrio (VL-mix) presenta casi el doble de disolución máxima en comparación con el vidrio de contenedores (V-C+P). El VL-mix tiene una disolución máxima de 72,69 g/kg, mientras que el V-C+P tiene una disolución máxima de 135,80 g/kg. A pesar de que las muestras fueron tamizadas y molidas para pasar por el tamiz

0,075 mm, la superficie específica de los materiales es diferente (VL-mix = 5,7 m²/g y V-C+P = 1,5 m²/g).

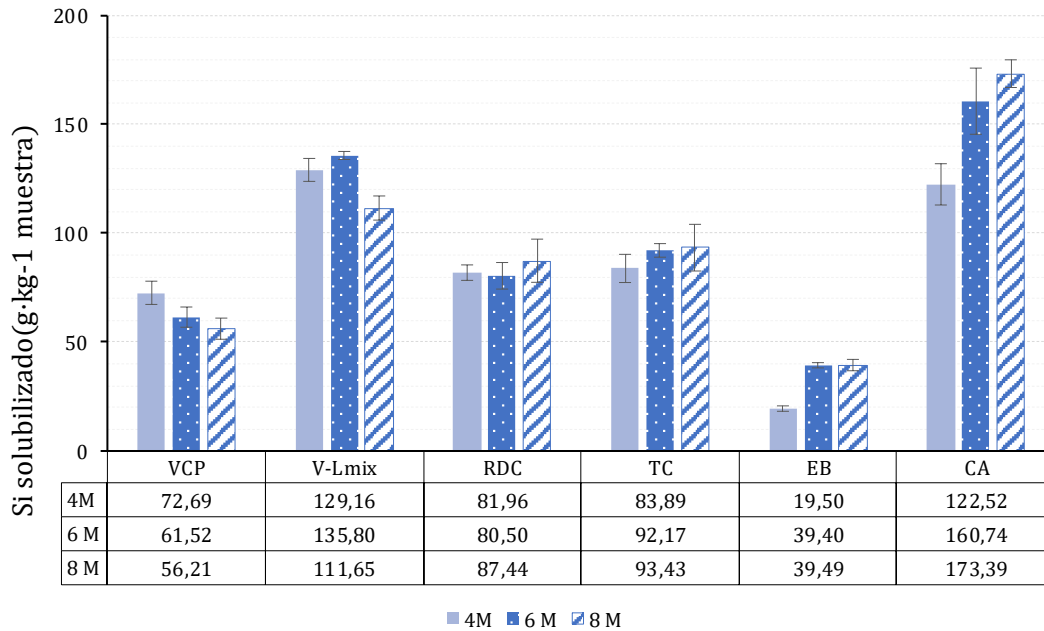


Figura 24. Si solubilizado como resultado del ataque alcalino con NaOH.

En el caso de los materiales cerámicos, la solubilidad máxima se alcanza al aplicar una solución 8M. El Testillo (TC) presenta una tendencia creciente al aumentar la molaridad de la solución. En el caso de la muestra RDC, no se observa una tendencia clara de aumento de la disolución con el aumento de la molaridad. En general, las diferencias en las disoluciones de silicio con las diferentes molaridades son muy bajas en ambos materiales. La mayor diferencia se encuentra en la muestra TC-F al comparar la disolución con solución 4M y 8M, y dicha diferencia corresponde solo al 10%.

La escoria de acero presenta los valores más bajos de solubilidad en todas las muestras, con un máximo de 39,49 g/kg de Al disuelto. Al emplear una solución de NaOH 6M, la solubilidad aumenta un 50% en comparación con el ensayo con solución 4M. Al aplicar una solución de mayor concentración (8M), el valor de disolución permanece prácticamente igual. Por lo tanto, la concentración óptima para este material sería de 6M.

El catalizador CA, según el análisis por FRX, muestra un 42,53% de silicio, mientras que materiales como el V-C+P contienen un 68,17%. Sin embargo, el CA presenta la tasa de

solubilidad más alta, con un valor máximo de 173,39 g/kg utilizando la solución 8M. La alta superficie específica (149,3 m²/g) y la estructura micro-porosa del catalizador pueden contribuir a este resultado. Las diferencias en la disolución máxima de Si al aumentar la molaridad de la solución son notables. Al cambiar de una solución 4M a una 6M, la solubilidad del CA aumenta un 24%, y al emplear la solución 8M, se disuelve un 7% más de material.

En cuanto a la disolución del aluminio, en general, los materiales presentan una tendencia creciente de disolución con el aumento de la molaridad. La Figura 25 resume los resultados de este test.

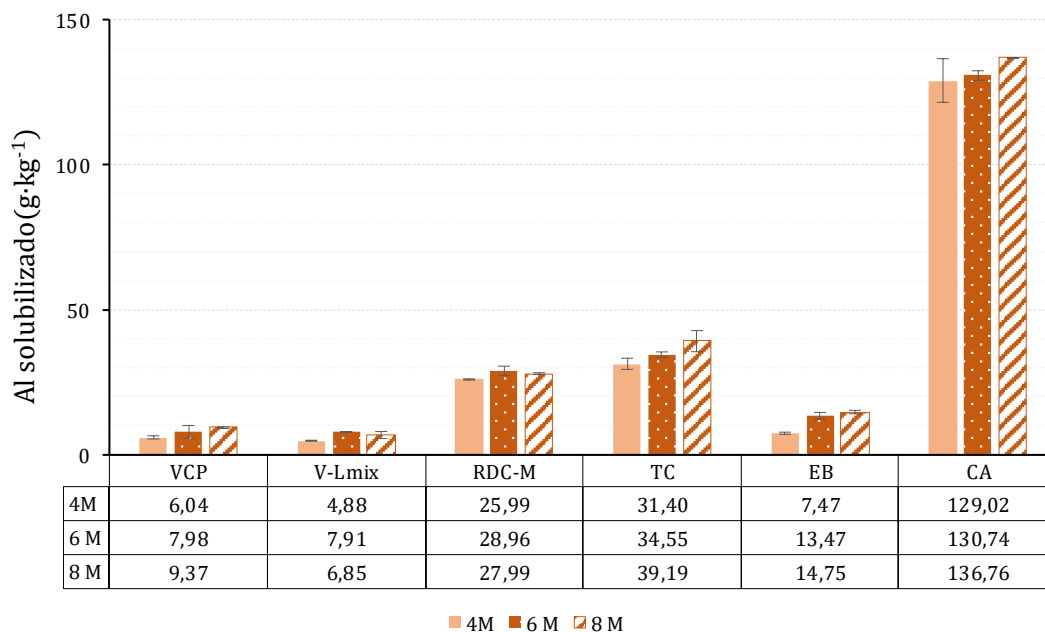


Figura 25. Al solubilizado como resultado del ataque alcalino con NaOH.

Los vidrios (V-C+P y VL-mix) presentan la disolución mínima entre todos los materiales. Esto concuerda con el hecho de que el VL-D y el V-C+P en el análisis por FRX muestran un contenido de Al de 3,78% y 2,85%, respectivamente, mientras que los demás materiales tienen un contenido de aluminio mayor (EB = 6%, RDC-M = 52,94%, TC-F = 62,89%, CA = 52,77%). Para el V-C+P, la diferencia de material no disuelto entre el ataque con solución 4M y el ataque con solución 8M es del 35%, y el punto óptimo de disolución se encuentra al utilizar la solución 8M. En el caso del VL-mix, la concentración óptima es de 6M, pero los valores de aluminio disuelto difieren solo en un 15% entre las soluciones 6M y 8M.

Para el TC-F, la solución que genera la mayor disolución de aluminio es la 8M, mientras que para el RDC-M es la 6M, aunque en este último caso las diferencias en el aluminio disuelto entre las soluciones 6M y 8M son solo del 3%. Por lo tanto, se puede decir que, en el caso de los materiales cerámicos, la disolución óptima de aluminio se sitúa alrededor de 6M.

La escoria de acero presenta un máximo de 14,75 g/kg de aluminio disuelto. Al utilizar una solución de NaOH 6M, se observa un aumento del 11% en la solubilidad en comparación con el ensayo utilizando una solución 4M. Al aplicar una solución de mayor concentración (8M), el valor de disolución se mantiene prácticamente igual. Por lo tanto, se concluye que la concentración óptima para este material sería de 6M.

A través del análisis por FRX, se puede observar que los materiales cerámicos presentan una cantidad de aluminio igual o mayor que la del catalizador CA (RDC-M = 52,94%, TC-F = 62,89%, CA = 52,77%). Sin embargo, la disolución de aluminio en el CA triplica el valor máximo de disolución de los cerámicos. Esto se explica por la presencia de más del 8% de componentes cristalinos con contenido de aluminio en el RDC-M y el TC-F, mientras que el CA no contiene compuestos cristalinos con aluminio. Además, el CA tiene una estructura amorfa en un 87%, mientras que el RDC-M y el TC-F tienen un 31% y un 57%, respectivamente. La presencia de una estructura amorfa facilita la ruptura de enlaces y, por lo tanto, la disolución del aluminio y otros compuestos.

Sumario

En la Tabla 28, se resumen las concentraciones óptimas para la máxima disolución de silicio y aluminio en cada uno de los materiales ensayados. Solo el V-C+P requiere una concentración mínima de 4M para lograr su disolución máxima, mientras que los demás materiales, en su mayoría, requieren una concentración de 8M.

Tabla 28. Concentraciones óptimas para disolución de máxima de Si y Al.

MUESTRA	Si		Al	
	Molaridad de solución NaOH	g/kg	Al	g/kg
<i>V-C+P</i>	4	72,69	8	9,37
<i>VL-mix</i>	6	135,80	6	7,38*
<i>RDC-M</i>	8	87,44	6	28,48*
<i>TC-F</i>	8	93,43	8	39,19
<i>EB</i>	6	39,45*	8	16,31
<i>CA</i>	8	173,39	8	136,76

*Para estas muestras, los valores de disolución máxima encontrados en los ensayos con concentraciones 6M y 8M fueron muy cercanos, por lo tanto, el valor promedio de material solubilizado se utiliza.

Considerando lo expuesto anteriormente, se establece que una solución de NaOH con una concentración de 5,5M sería apropiada para la disolución de todos los subproductos empleados.

4.3.1.2 L/S óptimo

Para realizar las primeras pastas fue necesario establecer unas dosificaciones iniciales aproximadas que permitieran una buena trabajabilidad para los diferentes precursores. Para tener un estimado del rango de L/S se realizó el ensayo de mesa de flujo descrito en la norma UNE-EN 1015-3. una vez identificados los valores de L/S mínimos y se obtenida una trabajabilidad mínima se evaluó la estabilidad hidrolítica de las pastas. Este último test verifica que el material presente una consolidación real, es decir que su consolidación no se debiera a compuestos solubles en agua.

Procedimiento

L/S mínimo

Todos los materiales fueron tamizados hasta pasar la apertura de 0.25 mm. 1 kg de cada material fue preparado con las respectivas cantidades de agua necesarias para alcanzar los ratios L/S requeridos. La fluidez mínima se estableció cuando, al retirar el cono, la muestra presentaba un diámetro mínimo de 20 mm por fuera del mismo (120 mm) el cual se dibujó en la mesa de flujo. Inicialmente fueron preparadas mezclas con L/S=0.15, 0.25, 0.30 y 0.45 sin activador. Sin embargo, para el subproducto de catalizador (CA) fue necesario llegar hasta L/S=0.5 para obtener una fluidez mínima. En la Figura 26 se ilustra el procedimiento.



Figura 26. Ensayo experimental para determinación de L/S mínimo.

Estabilidad hidrolítica de las pastas

Luego de obtener la mínima relación L/S para la trabajabilidad de las pastas se verificó que se diera un endurecimiento de los materiales midiendo la pérdida de masa en un ensayo de estabilidad hidrolítica. Teniendo en cuenta las relaciones L/S mínimas

obtenidas (ver Tabla 29) se elaboraron pastas con solución alcalina NaOH 5,5 M de acuerdo con el apartado 4.3.1.1. Las pastas fueron curadas a 60°C por 48h y luego selladas con plástico y dejadas en una cámara de 50% HR y 20°C. luego de los 28 días después de su fabricación un espécimen cúbico (25*25 mm) secado 24h en horno a 100°C para eliminar la humedad, fue sumergido en agua en ebullición a 200°C durante 20 min [74]. Pasado este tiempo los especímenes se secaron nuevamente y luego de permanecer en el horno a 100°C por 3 días se tomó nuevamente la masa.

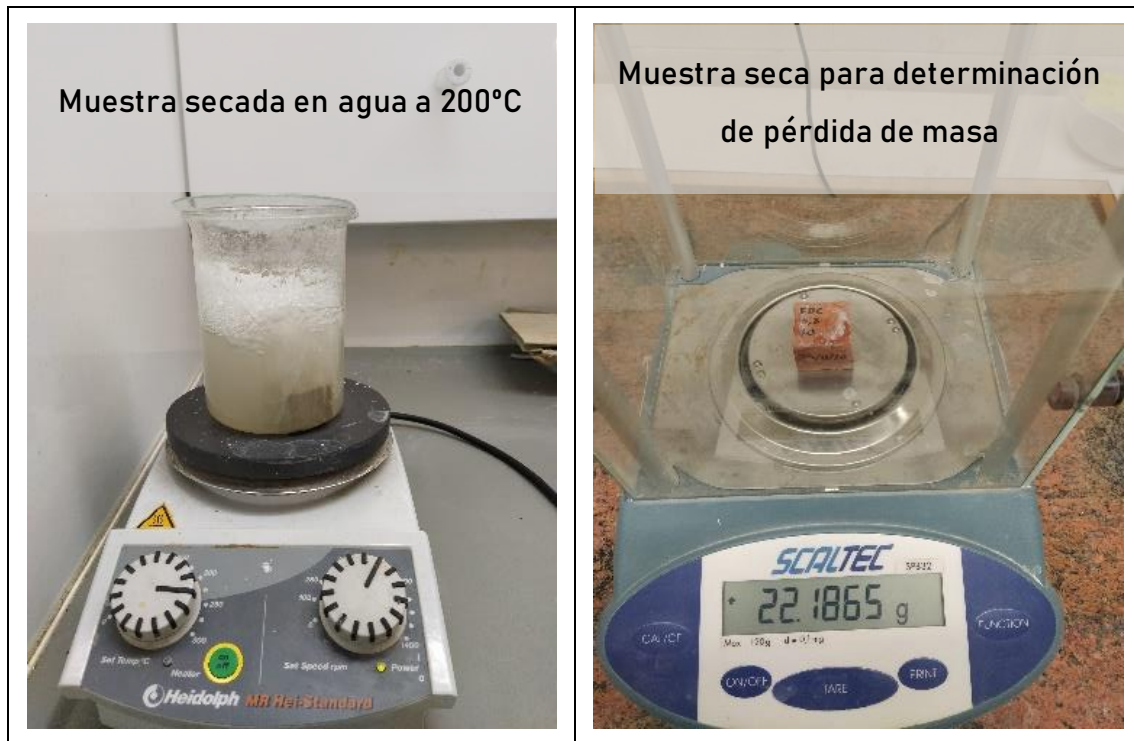


Figura 27. test de estabilidad hidrolítica.

Resultados

Las muestras de catalizador y las de escoria de acero (CA y EB) no presentaron endurecimiento con ninguna de las dosificaciones como se puede observar en el Figura 28. Al retirar dichas las muestras del horno parecían haber perdido su contenido líquido y al sacarlas de los moldes no era posible sacar una muestra compacta.

La falta de reactividad de las pastas de CA puede ser debida a la falta de silicio y a la gran demanda de agua ($L/S > 0,5$). Trochez et al. 2015 demostraron que debe haber un ratio $SiO_2/Al_2O_3 > 2,4$ para obtener resistencias en la pastas de FCC [34], sin embargo en el presente estudio las proporciones de mezcla presentaba un SiO_2/Al_2O_3 de 0,81. Por otra parte, en el capítulo 3 se encontró que la escoria de acero presenta propiedades

hidráulicas por lo tanto el curado térmico inicial pudo haber perjudicado el correcto fraguado del material.

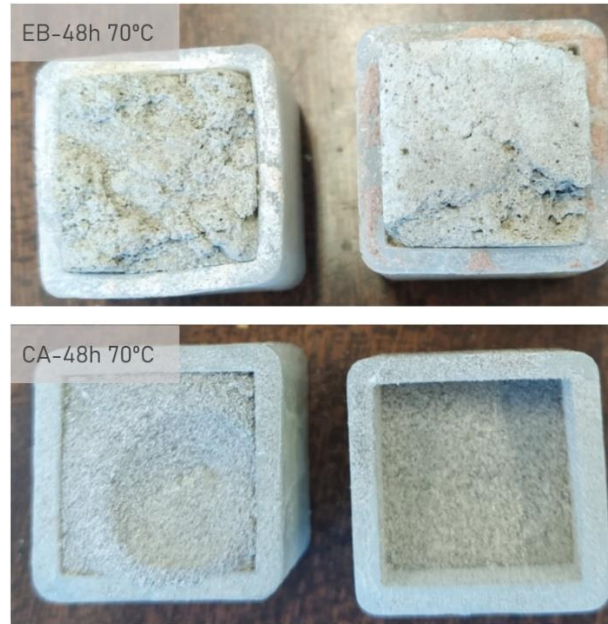


Figura 28. Muestras de Ca y EB sin fraguar.

En la figura 11 del capítulo 3 se puede observar que el los residuos con menos reactividad coinciden con los que tienen un menor contenido de silicio. Por otra parte en la tabla Partiendo de lo anterior, el ensayo de estabilidad hidrolítica sólo pudo ser realizado con las muestras restantes.

Los resultados de los dos procedimientos descritos se resumen en la Tabla 29.

Tabla 29. L/S mínimo y pérdida de masa de las muestras después del ensayo de estabilidad hidrolítica.

Material	L/S min	Pérdida de masa para muestras L/S=0.3 y 10% Na ₂ O (%)
<i>RDC</i>	0,25	1,6
<i>TC</i>	0,15	1,20
<i>V+C+P</i>	0,25	0,70
<i>VL-mix</i>	0,35	2,20
<i>CA</i>	0,50	Sin fraguado
<i>EB</i>	0,35	Sin fraguado

Los resultados encontrados coinciden con investigaciones previas descritas a continuación. Robayo-Salazar et al. 2017 estudiaron MAAs con cerámicos provenientes de ladrillo cocido como precursor y emplearon L/S=0.23 para todas sus mezclas [75]. Rivera et al. 2018 emplearon L/S=0,23-0.26 para sus MAA con precursor basado en

vidrio [36]. Tashima et al. 2012, utilizaron valores altos de L/ S (entre 0,45 y 0,6) [76] y Wang et al. 2016 mostró que con L/S= 0,35 era posible la activación de escorias de acero [9].

Aunque el TC y el RDC presentan composición similar al ser ambos cerámicos El RDC exhibió menor trabajabilidad que el TC probablemente debido a su mayor porosidad y mayor área de superficie específica (más información el capítulo 3) [77].

Sumario

Los valores de L/S óptimos son menores a 0,3 en los cerámicos, muy cercanos a 0,3 en los precursores provenientes de vidrio y escorias y mayores a 0,5 en los catalizadores. Bajo las condiciones estudiadas (curado térmico de 48h a 60°C, 28 días de curado en ambiente “seco”) los subproductos CA y EB no pudieron ser activados.

Teniendo en cuenta los rangos anteriores las relaciones L/S más adecuadas para la evaluación de las pastas con los diferentes precursores son: 0.25-0.3-0.45.

4.3.1.3 Evaluación mecánica de pastas

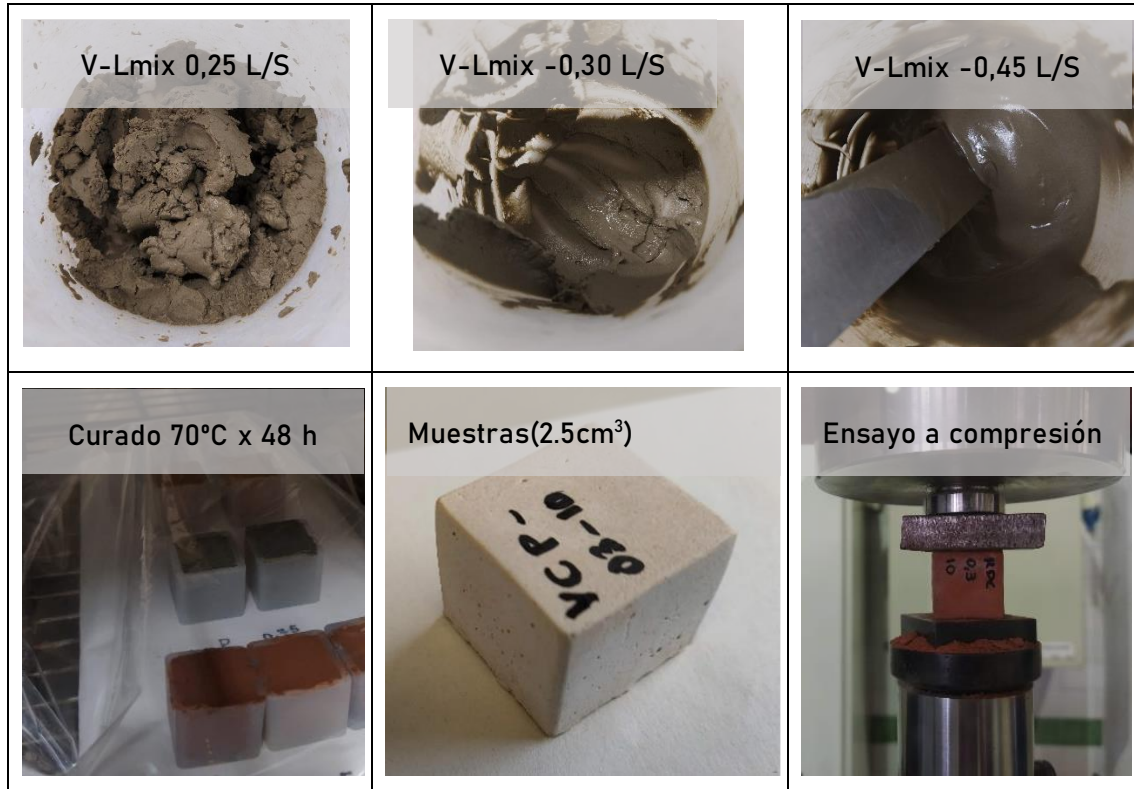
Para la evaluación de las pastas se realizaron ensayos de resistencia a compresión de pastas con variación de L/S y del porcentaje de Na₂O. Posteriormente se fabricó otro grupo de muestras de confirmación de resultados en donde se evaluó la resistencia a compresión, a flexión, la estabilidad hidrolítica y la densidad. A continuación, se describe más ampliamente la evaluación.

Procedimiento

Se prepararon especímenes cúbicos de 25x25x25 mm 6 por cada mezcla y por cada material (V-C+P, RDC-C, TC y VL-mix). En las probetas se modificó la relación L/S (0.25, 0.30 y 0.45) con una solución de NaOH 5,5 M la cual permitió compacidad suficiente para un fraguado en todas las muestras. Los especímenes fueron preparados como se indica en la UNE-EN 196-1:2018 y luego fueron curados durante 48 horas a 60°C, para posteriormente dejar fraguar en la cámara de curado con 50% HR por 29 días. A los 29 días se evaluaron sus resistencias a compresión. El procedimiento se ilustra en la

Figura 29. Una vez obtenidos dichos resultados se realizaron muestras con L/S=0.30 pero en este caso variando el contenido de Na₂O (5%, 10% y 15%)¹.

Figura 29. Muestras para evaluación de resistencia a compresión con variación de la relación L/S.



Las dosificaciones de mezclas de mejor desempeño a compresión de cada material fueron repetidas y se realizaron los ensayos de estabilidad hidrolítica, ensayos a flexión, determinación de la densidad y nuevamente se evaluó la resistencia a compresión. Lo anterior con el objetivo de confirmar los resultados con muestras de menor variabilidad (ver apartado 'Varianza de especímenes') y determinar los datos adicionales de compacidad y resistencia a la flexión. En este último test se prepararon 3 probetas de 4x4x16 cm³ y 4 cubos de 25x25x25 cm³ para cada dosificación.

Resultados

En general, los mejores resultados se obtuvieron en todos los materiales para una L/S de 0.3 y los peores para el L/S=0,25. Para el valor de L/S óptimo de 0,3 EL V-C+P presentó los valores mayores con 33,68 MPa de resistencia. Los máximos valores de resistencia para el TC, RDC y VL-mix fueron 27,43 MPa, 8,75 MPa y 7,9 MPa

¹ La concentración se calculó teniendo en cuenta el contenido propio de Na₂O de la muestra. Para el caso del vidrio por ejemplo un contenido de 10% de Na₂O equivalía a una solución 5,5 M

respectivamente. En las muestras de RDC y VL-mix con una relación L/S=0,25 no se presentó resistencia, dichas muestras, aunque parecían compactas, se desmoronaron en cuanto el pistón entró en contacto. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 30.

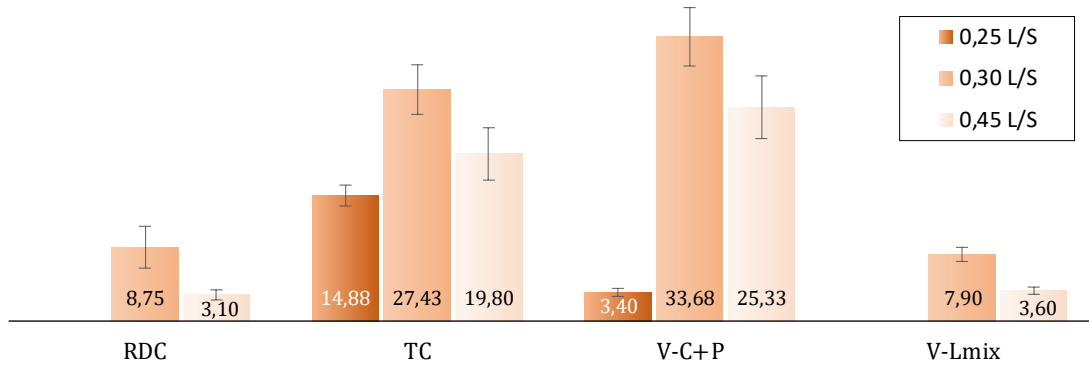


Figura 30. Resultados de resistencia compresión para diferentes residuos con variación de la relación L/S.

Los resultados de las muestras variando el contenido de Na₂O (5%, 10% y 15%) se muestran en la Figura 31.

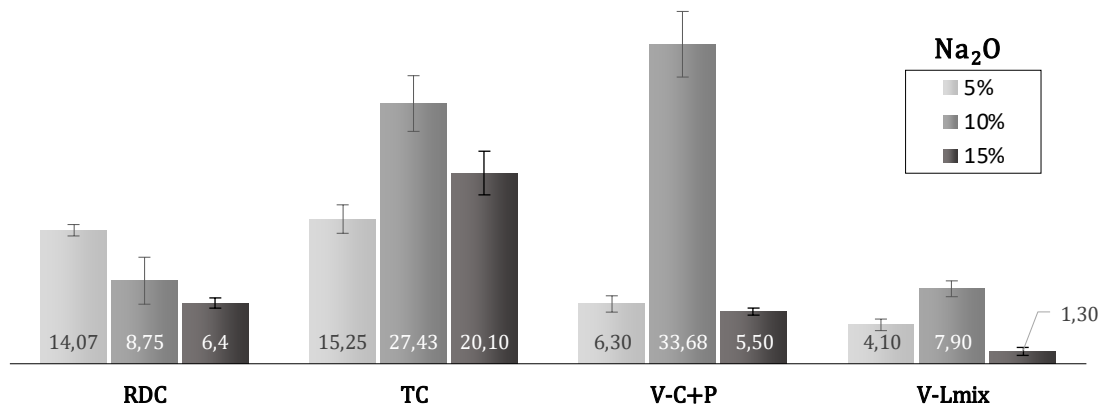


Figura 31. Resultados de resistencia compresión para diferentes residuos con variación del porcentaje de Na₂O para muestras de 0.3 L/S. Los %Na₂O son con respecto a toda la pasta.

Las muestras tuvieron un máximo desempeño mecánico con 10% de Na₂O (con variaciones importantes), exceptuando la muestra de RDC, la cual presentó una mayor resistencia con 5% de Na₂O con la que se obtuvo una resistencia de 14,07 MPa.

Las dosificaciones de mezclas de mejor desempeño a compresión de cada material fueron repetidas y se realizaron los ensayos de estabilidad hidrolítica, adicionalmente ensayos a flexión, densidad y nuevamente se evaluó la resistencia a compresión. Lo

anterior con el objetivo de confirmar los resultados con muestras de menor variabilidad y determinar los datos adicionales de compacidad y resistencia a la flexión.

Esta vez se prepararon seis probetas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ y 6 cubos de $25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$. Los resultados se muestran en la Tabla 30.

Pasta	Pérdida de masa En test de estabilidad hidrolítica (%)	Error (%)	R_c (MPa)	Error (%)	R_f (MPa)	Error (%)	Densidad (kg/m^3)	Error (%)
<i>V-C+P-0,3-10</i>	1,0	0,90	34,00	4,58	2,5	5,40	2453,0	3,2
<i>VL-mix-0,3-10</i>	25,0	1,30	8,50	3,29	3,25	2,80	1924,2	5,4
<i>TC-0,3-10</i>	0,9	1,00	21,67	4,29	2,60	4,10	2435,2	6,3
<i>RDC-0,3-5</i>	1,0	0,64	19,00	3,84	2,60	4,00	2250,1	2,1

Tabla 30. Resultados de estabilidad hidráulica, resistencia y densidad para pastas con dosificaciones óptimas para cada material.

De acuerdo con los resultados los valores de resistencia mecánica más favorables fueron para las pastas V-C+P-0.3-10. Con una resistencia de 34 MPa.

Sumario

Los mejores resultados de resistencia a compresión en pastas de V-C+P, RDC, TC y VL-mix se obtuvieron para una relación L/S de 0.3 y los peores para el L/S=0,25. Las muestras tuvieron un máximo desempeño mecánico con 10% de Na_2O , exceptuando la muestra de RDC, la cual presentó una mayor resistencia con 5% de Na_2O . Los valores de resistencia mecánica más favorables fueron para las pastas V-C+P-0.3-10. Con una resistencia en este caso de 34 MPa.

4.3.1.4 Evaluación mecánica de morteros

Teniendo en cuenta los valores de L/S y las dosificaciones de activación alcalina obtenidos en las evaluaciones anteriores se procedió a la realización de morteros y a la modificación de sus proporciones para evaluar el cambio en el comportamiento mecánico de los MAA en una matriz con menos cementante.

Se inició con la dosificación de un mortero estándar y debido a que los resultados no fueron favorables se realizaron posteriormente nuevas probetas con modificaciones en sus proporciones.

Procedimiento

Para la fabricación de las probetas de mortero se sigue la norma de referencia: UNE-EN 196-1:2018. 3 especímenes de 16^*4^*4 cm y 3 cubos de 4 cm^3 fueron fabricados por

cada subproducto, para evaluar la resistencia a flexión y a compresión a los 28 días. los precursores que lo requerían fueron triturados hasta pasar la apertura de tamiz de 0.25 mm. Los trozos restantes del ensayo a flexión también fueron utilizados como probetas para tener un mayor número de muestras a compresión. Los especímenes fueron expuestos a 60°C por 48 horas y luego dejados en una cámara de curado a 21 °C con HR 50%. Se aplicó el ensayo de mesa de flujo EN-1015-2 una vez mezcladas las distintas dosificaciones.

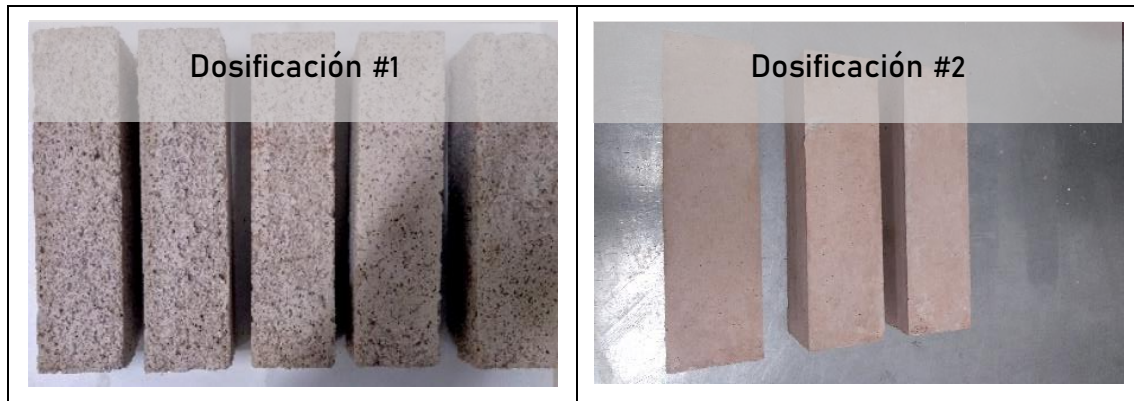


Figura 32. Morteros. Dosificación #1 A:P 3:1, b. Dosificación #2 A:P 1:1. A=Arena, P:precursor.

El primer grupo de especímenes se elaboraron con una dosificación #1 con las dosificaciones para morteros sugeridas en la norma EN-196-1:2018 reemplazando el agua de mezclado por una solución activadora 4.5 M y el cemento por el precursor. Igualmente se preparó una dosificación con cemento (CEM 45R).

Las muestras tuvieron un flujo prácticamente nulo y apariencia muy diferente a la dosificación patrón (CEM 45R). Para garantizar la mejor disolución del material se triplicó el tiempo de mezclado del activador con el precursor establecido por la norma (90 s en lugar de 30s). Las medidas tomadas no generaron ningún cambio por lo que se preparó una dosificación relación de arena precursor igual a 2:1 (A:P=2:1). En la última dosificación, el flujo aún era deficiente por lo que se elaboraron morteros con A:P=1:1 y se denominó dosificación #2.

Pese a las correcciones de la dosificación, los especímenes no tuvieron buena consistencia ni resistencia (verificada con los especímenes guardados). En consecuencia, se elaboró un grupo de muestras con una dosificación #3 manteniendo la relación de arena precursor (A:P) 1:1 pero con una relación A/P de 0.3.

Las dosificaciones de la norma (dosificación #1) y las de corrección (dosificación #2 y #3) se encuentran en la Tabla 31

Tabla 31. Dosificación de morteros para ensayos mecánicos.

Dosificación	#1 A:P 3:1 L/S=0,5 (EN-196-1:2018)			# 2 A:P = 1:1 L/S=0,5			# 3 A:P = 1:1 L/S=0,3		
	Precursor (g)	Arena (g)	Activador (g)	Precursor (g)	Arena (g)	Activador (g)	Precursor (g)	Arena (g)	Activador (g)
<i>Cantidad</i>	450	1350	225	1350	1350	675	1350	1350	405

Resultados

Los resultados de la resistencia mecánica con las dosificaciones 1 y 2 se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Resultados ensayos complementarios en morteros dosificaciones # 1 y 2.

Material	Rc dosificación #1 (MPa)	Error (%)	Rc dosificación #2 (MPa)	Error (%)	Rc dosificación #3 (MPa)	Error (%)
<i>RDC</i>	2.32	25.10	8.30	10,15	17,3	5,12
<i>TC</i>	3.65	30.53	7.40	12.3	18,4	7,1
<i>V-C+P</i>	6.80	38.99	10.13	6.8	20,2	6,3
<i>VL-mix</i>	7.91	50.22	7.00	17.6	10,2	19,5

Las muestras con la dosificación #1 resultaron poco fluidas (110 mm), visiblemente porosas y difíciles de compactar y desencofrar. Las probetas presentaron fracturas debido a la baja resistencia. La pérdida de resistencia puede atribuirse a la fuga de la solución alcalina, debido a la alta porosidad de la matriz. Además, los precursores tenían un tamaño de partícula de hasta 0.25 mm, mientras que el tamaño de partícula del cemento se encuentra entre 0.01 -0.005 mm. Un mayor diámetro de partícula implica una menor superficie específica, lo que genera mayores poros y una menor retención de agua en la mezcla.

La dosificación #1 patrón (CEM 45R) resultó en una mezcla trabajable (125 mm de flujo) y sin la porosidad evidente encontrada en las mezclas MAA. Esto demuestra que la finura del material afectaba la retención del activador. Sin embargo, debido a las limitaciones en los métodos de trituración, no fue posible obtener un material más fino con los volúmenes previstos. Como medida para garantizar una mejor disolución del material, se triplicó el tiempo de mezclado del activador con el precursor establecido por la norma (90 s en lugar de 30 s). Sin embargo, estas medidas no generaron cambios en el flujo (110 mm) ni en el aspecto poroso de las mezclas. Por lo tanto, se preparó una dosificación A:P = 1:1 (dosificación #2). A pesar de esta corrección en la dosificación, las resistencias de las muestras fueron inferiores a 10 MPa. Es posible que las muestras

con la dosificación #2 no desarrollaran una resistencia mayor debido a su alta fluidez. Los morteros tenían una relación Activador /Precursor (Ac/Pr) de 0.5 y, para todos los precursores, los flujos superaron el borde de la mesa de flujo. Como resultado, se preparó un grupo de muestras con una dosificación #3, con una relación A:P = 1:1 pero con una relación A/P de 0.3.

Los resultados de resistencia a compresión y flexión para la dosificación #3 se presentan en la Figura 33 y la Figura 34.

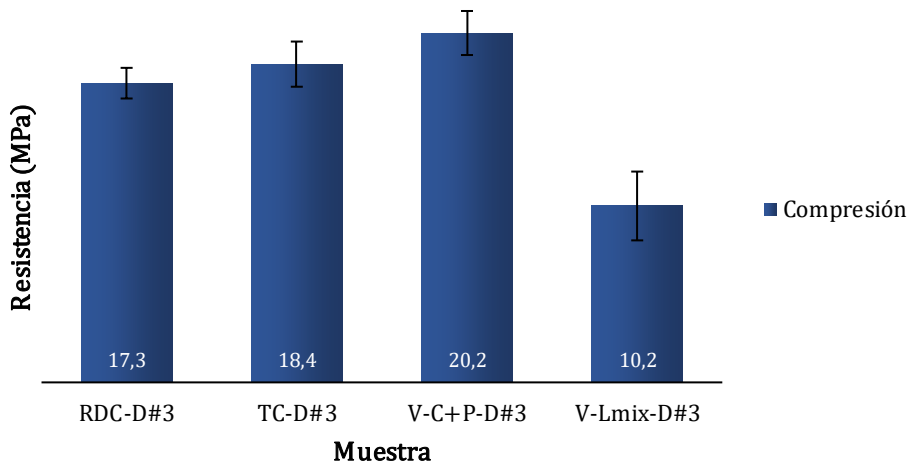


Figura 33. Resultados de resistencia compresión morteros con dosificación corregida (#3) relación A/P =0.3.

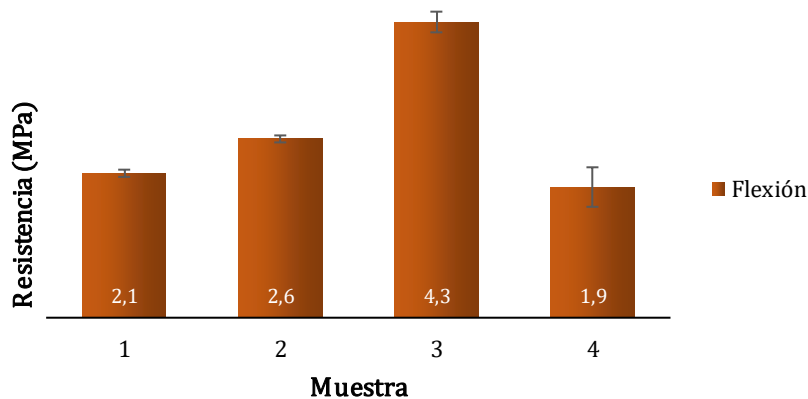


Figura 34. Resultados de resistencia flexión en morteros con dosificación corregida (#3) relación A/P =0.3.

Con las proporciones establecidas en la dosificación #3, se obtuvieron morteros trabajables y con resistencias a compresión entre 10 y 20 MPa a los 28 días. Las

muestras con mejor comportamiento fueron las de Vidrio de Contenedor (V-C+P), con una resistencia a compresión de 20.2 MPa. Las muestras de Testillo Cocido (TC) y ladrillo rojo (RDC) presentaron valores muy cercanos (18.4 y 17.3 MPa), mientras que la muestra de lodo de vidrio (VL-mix) tuvo un valor considerablemente inferior (10 MPa).

Tabla 33. Resultados ensayos complementarios en morteros para dosificación #3 (D#3) .

Muestra	Flujo (mm)	Densidad (kg/m ³)	Error (%)
<i>RDC-D#3</i>	139	1989,36	8,51
<i>TC-D#3</i>	144	1998,27	7,95
<i>V-C+P-D#3</i>	170	2001,54	5,5
<i>VL-mix-D#3</i>	163	2120,08	23.5

En la Tabla 33 se presentan los resultados de los ensayos complementarios de densidad y flujo en los morteros con la dosificación #3 (D#3). Se observa que las muestras presentan densidades por encima de 1900 kg/m³, siendo los morteros con lodo de vidrio (VL-mix) los más densos y los morteros de ladrillo rojo (RDC) los más ligeros. Además, se encontró que el mortero de vidrio de contenedor (V-C+P) fue el más fluido, mientras que el de ladrillo rojo (RDC) fue el menos fluido, con valores de flujo entre 170 y 139 mm, respectivamente.

La inclusión de la arena crea una reducción de un 50% de cementante en la matriz. Este cambio respecto las pastas generó una caída de la resistencia para cada uno de los precursores como sigue: RDC=-8,9%, TC=-15, V-C+P=-40. Sin embargo, para el VL-mix hubo un incremento de la misma del 20% pasando de 8,5 a 1.2 MPa aunque sigue siendo el material con mayores desviaciones en los resultados.

La muestra VL-mix muestra un comportamiento atípico, presentando la mayor densidad pero, al mismo tiempo, las menores resistencias. Los valores de errores también son notablemente mayores en los resultados de densidad y en los ensayos mecánicos (ver Tabla 33). La caída de resistencia en estas muestras podría atribuirse a la retracción.



Figura 35. Muestra de mortero VL-mix D#3. Se observan múltiples fisuras en la superficie relación A/P =0.3.

Se observaron múltiples fisuras en la superficie de las muestras, lo que sugiere una alta retracción durante el curado. Estas fisuras y posibles deformaciones podrían explicar los valores notablemente mayores de errores en densidad y en los ensayos mecánicos.

Estas muestras, presentaron diferencia de coloración entre la superficie y el fondo. Esto último puede ser debido a la acumulación de activador en la superficie por algún proceso de sangrado limitado por el sellado de las muestras. Las fisuras por retracción y posibles deformaciones de la muestra podrían explicar los valores de errores notablemente mayores en densidad y en los ensayos mecánicos.

Aunque todas las muestras fueron tamizadas a <0.25 mm, el precursor VL-mix posee una mayor finura en comparación con las demás muestras, como se pudo apreciar en los valores de superficie específica dados en el capítulo 3 de la tesis doctoral. Esta alta finura podría contribuir a una mayor retracción y a un menor valor de flujo, pero también a una mayor densidad en comparación con las demás muestras. Además, se observó que las muestras VL-mix mostraron el mejor comportamiento con la dosificación #1, en la cual tenían una mayor cantidad de agua disponible, pero al mismo tiempo presentaron errores más altos que las demás muestras (50.22%).

Sumario

Al cambiar la matriz de pasta a mortero la finura del material afecta la retención del activador. La reducción de un 50% de cementante en la matriz generó una caída de la resistencia para cada uno de los precursores entre el 8 y el 40%. Las proporciones de mortero normalizado y un tamaño de partícula de 0.2 mm se obtienen mezclas con flujos muy bajos y el activador escapa por la porosidad generando bajas resistencias. Con una dosificación con relación de arena precursor (A:P) 1:1 y una relación L/S de 0.3 se obtienen resistencias entre los 10 y los 20 MPa a los 28 días. Las muestras con mejor comportamiento fueron las de Vidrio de contenedor (V-C+P) con una resistencia a compresión de 20.2 MPa. Los morteros de Testillo cocido y el ladrillo rojo (TC- RDC) presentaron valores muy cercanos mientras que la muestra de lodo de vidrio (VL-mix) tuvo un valor muy inferior a las demás muestras y presentó retracción.

4.3.1.5 Evaluación mecánica de hormigón

El objetivo de la el apartado 4 es obtener un material activado alcalinamente con un comportamiento y resistencia a compresión equivalentes a un hormigón de 25 MPa,

para poder cumplir con los requisitos estructurales de la [nombre de la entidad]. Hasta el apartado anterior, las resistencias máximas obtenidas fueron de 20.21 MPa con el subproducto de vidrio de contenedor (V-C+P). Al cambiar de un mortero a un hormigón, se espera una reducción en la resistencia debido a la reducción de la proporción del cementante. Por lo tanto, se deben tomar medidas para mitigar esta reducción en la resistencia mecánica.

Con el fin de mantener o incrementar las resistencias alcanzadas en los morteros, se redujo el tamaño de partícula de los precursores de <0.25 a <0.12 mm como primera medida. Como segunda medida, se incluyó un 1% de waterglass EssentQ® con respecto al precursor. El waterglass introducido tiene una composición de 70% H₂O, 2.5% Na₂O y 27.3 SiO₂. Por último, se incrementó la temperatura de curado de 60 a 70°C.

Al igual que en los morteros, se realizaron pruebas y se ajustaron las proporciones de la mezcla hasta obtener una consistencia fluida para cada material. Finalmente, la proporción del agregado grueso (4-6 mm) fue de 1:0.4 y la proporción de arena normalizada fue de 1:0.8 con respecto al precursor, manteniendo la relación L/S en 0.3.

Posteriormente, se fabricaron muestras bajo las mismas proporciones, pero sometidas a un curado térmico de 2 días (96 horas) a 70°C, según se detalla en los resultados.

Procedimiento

Para la fabricación de las probetas, se siguió la norma de referencia: EN 196-1:2018. Los especímenes consistieron en 6 muestras tipo viga de 1644 cm y 3 cubos de 4 cm³.

Se ensayaron las vigas para evaluar la resistencia a flexión y a compresión a los 28 y 48 días, y los cubos para evaluar la resistencia a flexión a los 177 días.



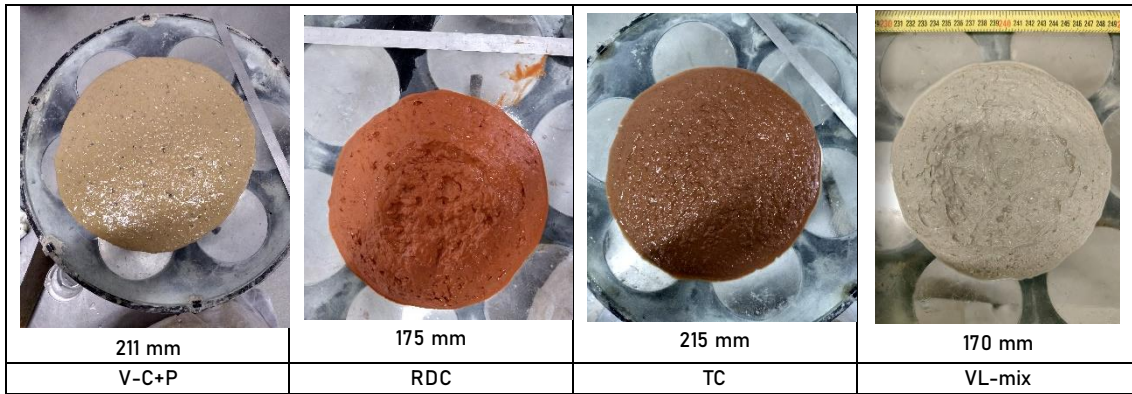
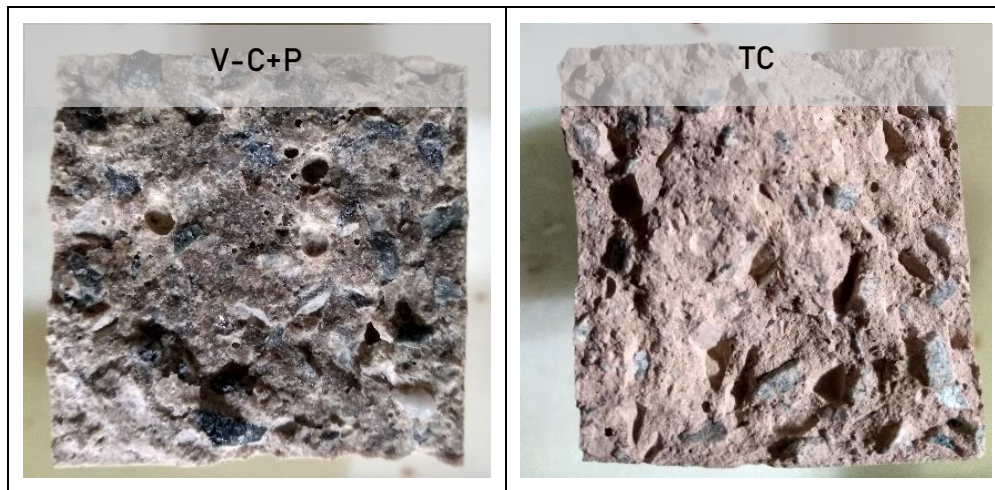


Figura 36. Hormigones MAA. Muestras para cada material y resultado de ensayo de flujo.

Los especímenes fueron expuestos a 70°C durante 48 horas y luego almacenados en una cámara de curado a 21°C con una humedad relativa del 50%. Los ensayos mecánicos de compresión se realizaron a los 28, 48 y 177 días. La Figura 36 muestra el proceso y los resultados del ensayo de la mesa de flujo.

Con las dosificaciones finales, la mezcla con el precursor V-C+P mostró los resultados más favorables en cuanto a la resistencia a compresión y flexión. Los resultados para las muestras a diferentes edades se muestran en la Figura 38.



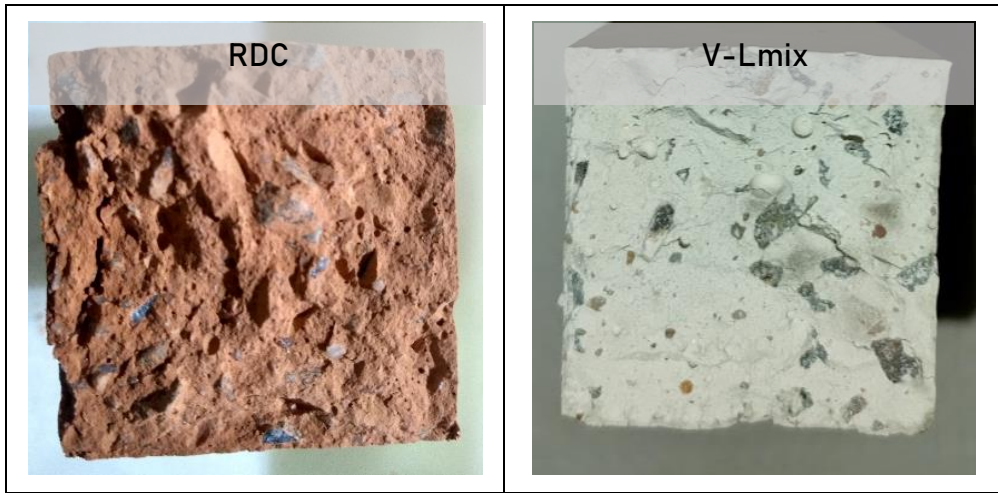


Figura 37. Hormigones elaborados con tamaño de partícula de precursor inferior a 0.12 mm.

Los resultados muestran un comportamiento variable de las muestras. Los hormigones con el precursor VL-mix exhiben un incremento en la resistencia hasta los 48 días, con un valor máximo de Rc de aproximadamente 21 MPa y un valor mínimo de 12.45 MPa a los 28 días, lo que representa un aumento de casi el 50% en la resistencia. La resistencia a la flexión también aumenta en un 23% en el período de 28 a 48 días.

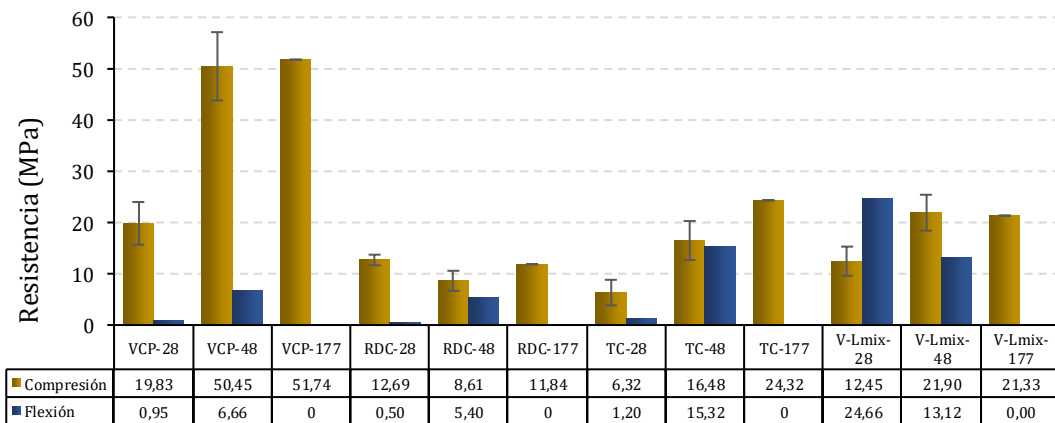


Figura 38. Resultados a compresión de hormigones elaborados con V-C+P, TC, VL-mix y RDC.

Los MAA con el precursor V-C+P muestran un desarrollo de la resistencia de hasta un 38.33% a los 28 días. El valor máximo de Rc se encuentra alrededor de 51.74 MPa a los 177 días, y el valor mínimo es de 19.83 MPa, lo que representa un aumento del 61.67% en la resistencia. La resistencia a la flexión también aumenta en un 37.47% en el período de 28 a 48 días.

Los especímenes con el precursor RDC presentan una leve disminución en la resistencia hasta los 177 días. El valor máximo de Rc se encuentra alrededor de 12.69

MPa a los 28 días, y el valor mínimo es de 8.61 MPa a los 48 días, seguido de un aumento hasta los 11.84 MPa, lo que representa una disminución del 7.18% en la resistencia. La resistencia a la flexión es baja (1.97 MPa), pero aumenta en un 47.61% en el período de 28 a 48 días. Las resistencias desfavorables en las muestras RDC pueden estar relacionadas con la diferencia en la trabajabilidad y la falta de disolución. Además, se observaron importantes fisuras superficiales en las vigas.

Las muestras con el precursor TC exhiben un aumento en la resistencia hasta los 177 días. El valor máximo de R_c se encuentra alrededor de 24.32 MPa, y el valor mínimo es de 6.32 MPa a los 28 días, lo que representa un incremento del 74% en la resistencia. La resistencia a la flexión también aumenta en un 34.21% en el período de 28 a 48 días.

Por último, los MAA con el precursor VL-mix exhiben un incremento en la resistencia hasta los 48 días. El valor máximo de R_c se encuentra alrededor de 21.90 MPa, y el valor mínimo fue de 12.45 MPa a los 28 días, lo que representa un aumento del 43.15% en la resistencia. La resistencia a la flexión también aumenta en un 34.21% en el período de 28 a 48 días.

Variación de la resistencia con periodo de curado térmico

En el procedimiento anterior, se observó una humedad inusual en las muestras de RDC y TC después del período de curado, e incluso algunas muestras de RDC presentaron fisuras blandas. Estos dos materiales presentaron una relación L/S óptima menor a 0.3 en un procedimiento anterior.

Por lo tanto, se realizaron nuevas muestras bajo las mismas proporciones, pero sometidas a 2 días (96h) de curado térmico a 70°C y posteriormente a temperatura ambiente (20°C). Los resultados de la resistencia a compresión a los 48 días se muestran en la próxima figura.

Los resultados muestran que el efecto del curado térmico varía según el material utilizado. Las muestras RDC y TC experimentan aumentos significativos en la resistencia a compresión después de 96 horas de curado térmico, con incrementos del 42.7% y 46.1%, respectivamente, en relación con sus resistencias máximas (15 y 30.8 MPa).

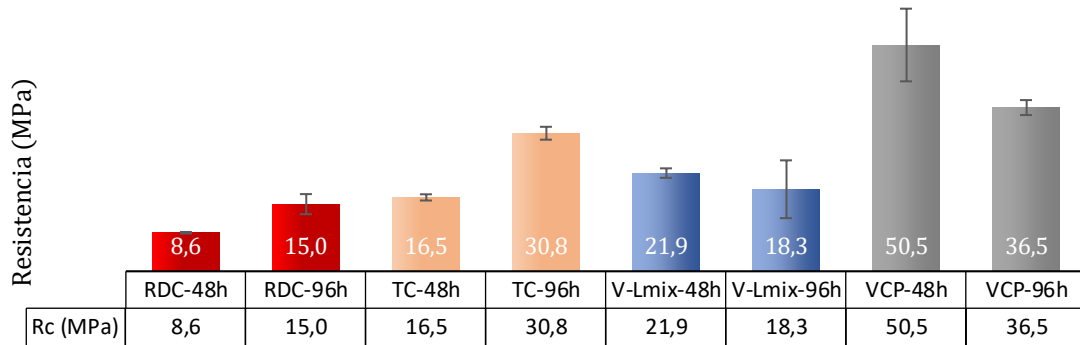


Figura 39. Hormigones elaborados con diferente tiempo de curado: 48 h y 96 h.

Por otro lado, las muestras VL-mix y V-C+P presentan reducciones en la resistencia a compresión después de 96 horas de curado térmico, con disminuciones del 16.4% y 27.7%. Estos hallazgos indican que la respuesta de cada material al curado térmico es distinta y resalta la importancia de considerar el tiempo y la temperatura de curado térmico óptimos para lograr la resistencia deseada en cada caso.

Sumario

El porcentaje de resistencia mínima a los 48 días con respecto a la resistencia a los 177 para cada precursor es corresponde a los siguientes valores: 97.5% para V-C+P, aproximadamente 72.7% para RDC, cerca del 67.7% para TC y un 100% para VL-mix.

El efecto del curado térmico varía según el precursor, para los cerámicos hay un aumento en la resistencia a compresión después de 96 horas de curado térmico, con incrementos alrededor del 40%, y sus resistencias máximas fue de 30.8 MPa para el TC. Por el contrario, las muestras con precursores basados en vidrio presentan reducciones en la resistencia a compresión de hasta un 27.7%. En la Tabla 34 se resumen las tendencias del comportamiento de la resistencia de las muestras con el tiempo y con el periodo de curado térmico.

Tabla 34. Resumen de resultados ensayos en hormigones y tendencias de la resistencia para cada material.

Muestra	$R_{c\max}$ (MPa)	Tiempo de curado térmico óptimo (horas)	Observaciones
RDC-28	14,97	96	Pérdida de Rc (7,18%) después de 28 días con curado térmico de 48h. En esta condición se observa alta humedad.

TC-177	30,78	96	Estable en las dos condiciones de curado, pero incremento lento de la resistencia con curado térmico 48h. En esta condición se observa humedad.
V-C+P	51,74	48	Estable
VL-mix-48	21,90	48	Estable con muy leve disminución a largo plazo y mayor dispersión de resultados. Se observa alta retracción.

4.3.1.6 Sumario general

En cuanto a las condiciones de curado de los diferentes precursores se puede concluir que:

- Las relaciones L/S más adecuadas para la evaluación de las pastas con los diferentes precursores son: 0.25-0.3-0.45.
- Los subproductos CA y EB no pudieron ser activados probablemente debido a su bajo contenido de silicio y a que el curado térmico no parece favorecer a su consolidación.
- Las muestras con los precursores V-C+P y TC tienen una tendencia general de aumento en la resistencia a compresión a medida que aumenta el tiempo de curado. Por otro lado, las muestras con el precursor RDC tienen una disminución inicial en la resistencia, seguida de un aumento después de los 48 días. Las muestras con el precursor VL-mix también muestran un aumento en la resistencia, pero en menor medida en comparación con V-C+P y TC.
- Al duplicar el periodo de curado térmico de 48 a 96 horas se puede observar que los especímenes con precursores cerámicos (TC y RDC) mejoran su resistencia en un 42.50% y un 46.46%, respectivamente, mientras que los especímenes con precursor tipo vidrio (V-C+P y VL-mix) disminuyen su resistencia en un 16.4% y un 29.7%, respectivamente.

Estos hallazgos indican que la respuesta de cada material al contenido de líquido al % de sodio al curado térmico es distinta pero las tendencias son similares si agrupamos los materiales en cerámicos y materiales tipo vidrio. Lo anterior resalta la importancia de considerar el tiempo y la temperatura de curado térmico óptimos para lograr la resistencia deseada en cada caso.

Debido al desempeño mecánico de las pastas para las siguientes evaluaciones se empleará como precursor el material (V-C+P).

4.3.2 Caracterización del MAA base (V-C+P)

Una vez que el precursor V-C+P ha alcanzado una resistencia a la compresión de 25 MPa, se ha establecido este material como la base para el MAA final de la tesis doctoral.

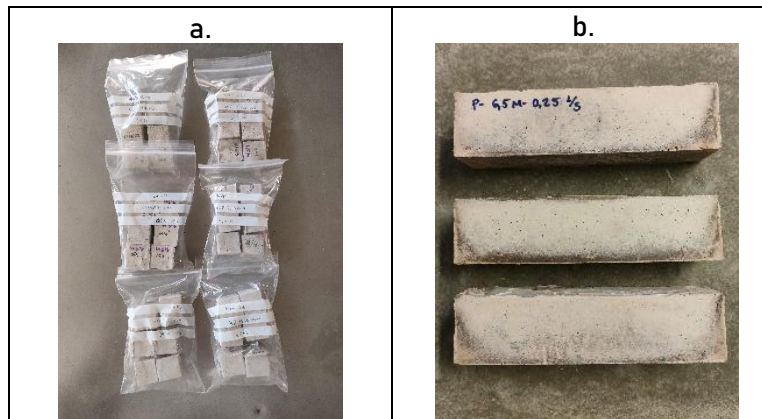


Figura 40. Muestras. a) Pastas para análisis químico. b) Pastas para comportamiento mecánico.

Tabla 35. Muestras para la caracterización química de pastas de V-C+P. Amf= amorfo.

En esta sección, se examinan en detalle las características químicas de este material mediante la realización de pruebas en pastas con diferentes concentraciones de activador y relaciones L/S.

Se prepararon 9 especímenes de 2,5x2,5x2,5 cm³ para los análisis químicos, y se elaboraron especímenes prismáticos de 4x4x16 cm³ para la evaluación mecánica. Los detalles de las muestras se describen en la Tabla 35.

Pasta	Concentración de solución alcalina (M)	L/S	SiO ₂ /Na ₂ O	SiO ₂ /Na ₂ O _{amf}	Si/Na	Si/Na _{amf}	%Na ₂ O _{t amf}	%Na _{t amf}
P-0.25-4.0	4,0	0,25	4,61	4,46	4,11	3,61	11,97	6,39
P-0.30-4.0	4,0	0,3	4,42	4,28	3,36	3,36	11,95	6,51
P-0.40-4.0	4,0	0,4	4,10	3,96	2,97	2,97	11,93	6,71
P-0.25-6.5	6,5	0,25	4,08	3,95	2,94	2,94	13,24	7,56
P-0.30-6.5	6,5	0,3	3,85	3,72	2,69	2,69	13,41	7,86
P-0.40-6.5	6,5	0,4	3,46	3,35	2,29	2,29	13,71	8,39
Relaciones Si-Al	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 24,62		SiO ₂ /Al ₂ O _{3 amf} = 23,83		Si/Al= 24,62		Si/Al _{amf} = 23,83	
Relaciones Si-Ca	SiO ₂ /CaO= 7,00		SiO ₂ /CaO _{amf} = 6,78		Si/Ca= 7,00		Si/Ca _{amf} = 6,78	

En las pastas, la relación molar Si/Al fue superior a 20 en todos los sistemas debido al bajo contenido de aluminio en el material de partida (aproximadamente 2%). El contenido de calcio (Ca/Si) se encontró entre 0.14 y 0.15.

4.3.2.1 Resistencia mecánica

Después de 48 días, se realizaron ensayos de compresión y flexión en los especímenes, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 40. Se puede observar que la relación $L/S = 0.30$ es la más favorable para ambas concentraciones de activador, y que los resultados mecánicos difieren en menos del 5% al cambiar la concentración del activador.

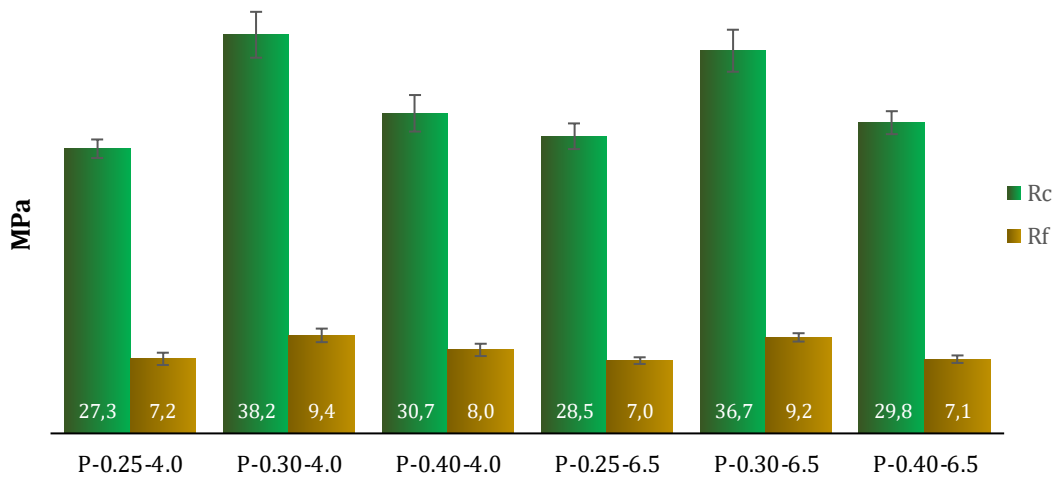


Figura 41. Resultados de resistencia mecánica para las pastas V-C+P con variación de la molaridad y la relación L/S.

Incluso las pastas con concentración P-0.3-4M mostraron una resistencia a la compresión ligeramente mayor que las pastas P-0.3-6.5M (38.2 frente a 36.7 MPa). Estos resultados concuerdan con el hecho de que la máxima disolución de Si se obtuvo para una solución 4M (ítem 4.3.1.1).

La resistencia a la flexión siguió la misma tendencia que la resistencia a la compresión y sus valores fueron entre un 24% y un 26% de la resistencia a la compresión.

Estos resultados serán comparados con los resultados de los análisis microestructurales.

Sumario

La relación $L/S = 0.30$ es la más favorable para ambas concentraciones de activador. Los resultados mecánicos difieren en menos del 5% al cambiar la concentración del activador. Las pastas P-0.3-4M mostraron una resistencia máxima de 38.2 MPa y la resistencia a la flexión fue entre un 24% y un 26% de la resistencia a la compresión

siguiendo sus mismas tendencias. Estos resultados concuerdan con el hecho de que la máxima disolución de Si se obtuvo para una solución 4M.

4.3.2.2 DRX-Fases cristalinas y amorfas

Se observó un acentuamiento del halo característico del material amorfo (entre 25 y 29 2θ) y un ligero desplazamiento hacia valores de 2θ más altos (30°-32°) a medida que se aumentaba la molaridad y la concentración del activador alcalino. Además, las señales características del N-A-S-H (42 2θ), C-S-H (50, 30 y 18 2θ) y cuarzo (34 2θ) se intensificaron.

Los cambios hacia valores más altos y el acentuamiento del halo se asocian con la precipitación en gel de N-A-S-H [78], un mayor contenido de Na_2O en los principales productos de reacción formados [37] o formación de nuevas fases amorfas, siendo indicativo de la reacción geopolimérica [79].

Se realizó un segundo análisis de DRX con rietveld a los 90 días y se encontró se observa un halo entre 10-15 2θ en las pastas de 6.5 M. Varios autores que han preparado pastas activadas con vidrio en condiciones similares muestran este halo en edades avanzadas [80] [81] pero no aparece a temprana edad [37][82].

Los espectros de las investigaciones previas mencionadas se pueden encontrar en el Anejo 7, y los autores no mencionan una interpretación para este resultado.

Después de la activación alcalina, las fases cristalinas de cuarzo cambian, dando lugar a la formación de albita, mullita y contenidos de nitrato de sodio, según los espectros de DRX. Para las muestras de 4M, el contenido de cuarzo alcanza su valor máximo a una relación L/S de 0.30 y luego disminuye. En cuanto a la fase de nitrato de sodio, este comportamiento es opuesto.

Para las pastas de 6.5 M, se observa una mayor presencia de cuarzo y una menor cantidad de albita y nitrato de sodio. La mullita se mantiene prácticamente constante en todas las pastas.

La fase amorfa se redujo entre un 2% y un 5% en todas las muestras en comparación con el precursor original, pero fue más evidente en las muestras de 4M. En general, las fases amorfas no variaron más del 1% con respecto a la relación líquido-sólido. En la Tabla 28 se muestra que la mayor tasa de solubilidad para el V-C+P se logra con una solución 4M, lo que favorecería la formación de nuevos compuestos.

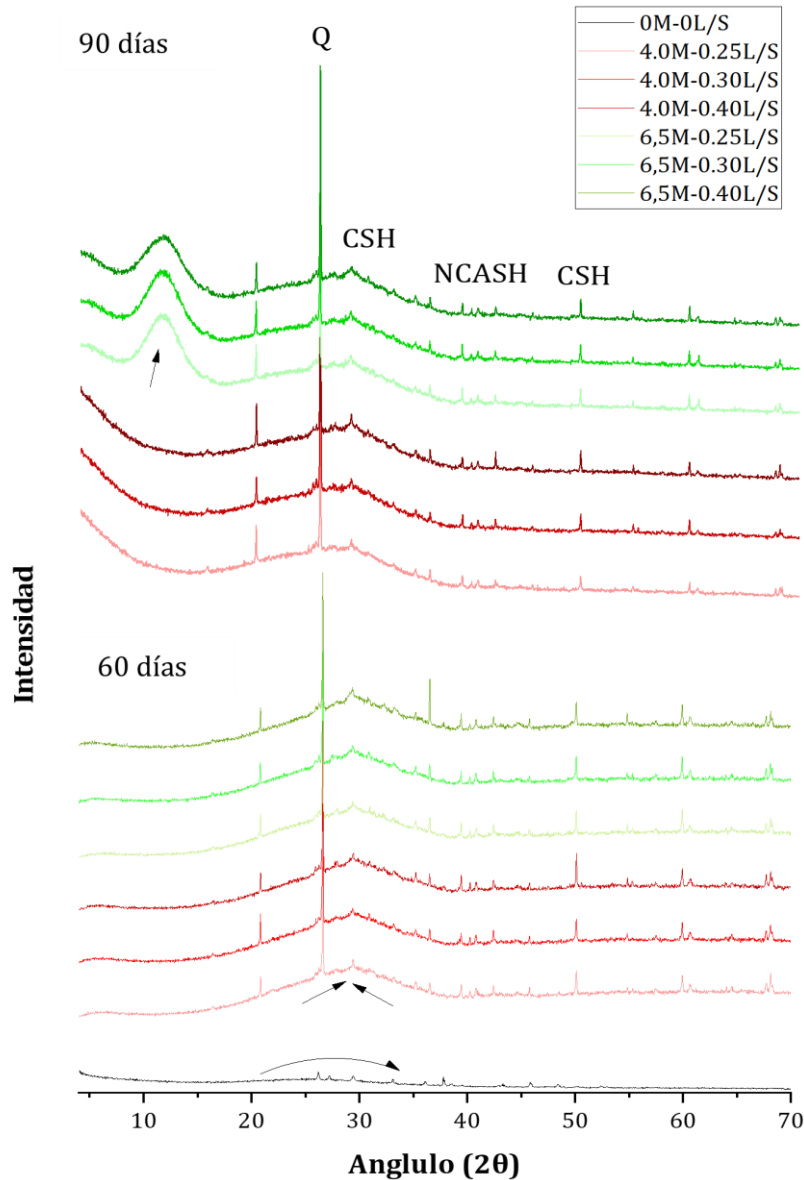


Figura 21. Resultados de la DRX de pastas de V-C+P (60 y 90 días) con diferente concentración de activador y diferente L/S. Q: Cuarzo SiO_2 . Referencias de compuestos: por análisis Rietveld y por [77].

Sumario

Se observó que, al aumentar la molaridad y la concentración del activador alcalino, se produjo un acentuamiento del halo característico del material amorfo en ángulos de 25 a 29° , y un desplazamiento ligeramente hacia ángulos más altos de 2θ (30° - 32°). Además, se intensificaron las señales características del N-A-S-H, C-S-H y cuarzo. Estos cambios indican la precipitación en gel de N-A-S-H, un mayor contenido de Na_2O en los productos de reacción.

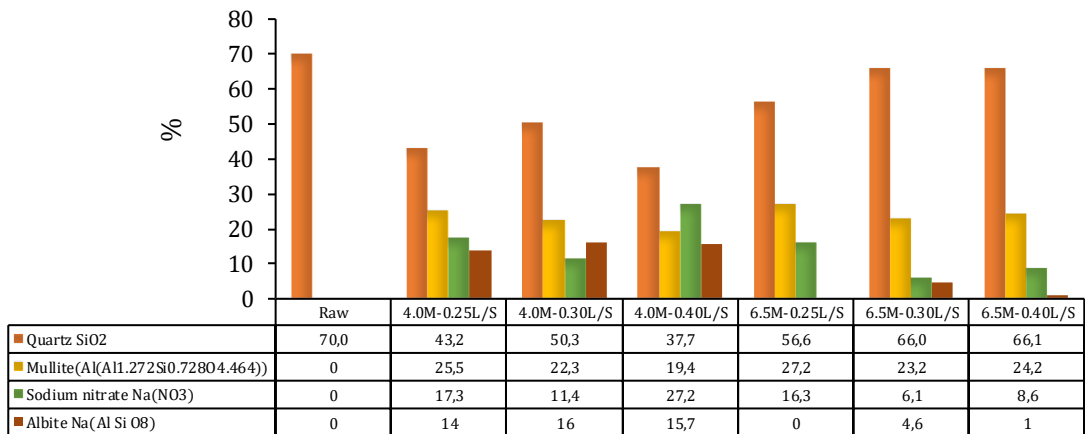


Figura 42. Cuantificación de la fase cristalina DRX (error ± 1%)

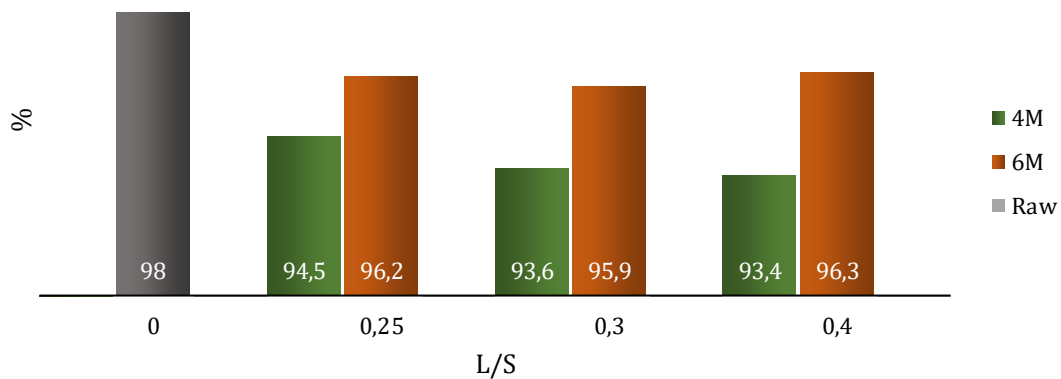


Figura 43. Variación de la fase amorfa para las diferentes pastas de V-C+P.

En un segundo análisis de DRX realizado a los 90 días, se observó un halo entre 10 y 15 2θ en las pastas de 6.5 M. Este resultado es consistente con estudios previos que han utilizado vidrio en condiciones similares en etapas avanzadas y que no se observa en etapas tempranas. Los autores no proporcionan una interpretación para este resultado.

Además, se encontró que después de la activación alcalina, las fases cristalinas de cuarzo cambian, dando lugar a la formación de albita, mullita y contenidos de nitrato de sodio. Las muestras de 4M muestran un contenido máximo de cuarzo a una relación líquido-sólido de 0.30. Las pastas de 6.5 M presentan una mayor presencia de cuarzo y una menor cantidad de albita y nitrato de sodio.

Por último, la fase amorfa se redujo entre un 2% y un 5% en todas las muestras en comparación con el precursor original, siendo más evidente en las muestras de 4M.

4.3.2.3 RMN-Cambios en la estructura molecular

Los espectros deconvolucionados de ^{29}Si RMN permitieron examinar la formación de especies de silicato en la matriz, revelando detalles sobre la organización de los tetraedros de silicio y las interacciones con los compuestos presentes. Además, mediante los espectros deconvolucionados de ^{27}Al RMN, fue posible estudiar la formación de especies de aluminato y analizar la distribución de los iones de aluminio en la red vítrea. Las muestras de pastas fueron conservadas en bolsas selladas de plástico hasta los 56 días y se molturaron al igual que los materiales precursores para los análisis químicos en el capítulo 3.

VI. Cambios en las estructuras de Aluminio ^{27}Al -RMN

Las Figura 44 y la Figura 45 muestran, respectivamente, los espectros de RMN ^{29}Si y ^{27}Al MAS y los cambios en las bandas para las diferentes ratios L/S y molaridades en las pastas de V-C+P activadas.

Se puede encontrar un pico atribuido a la especie Al(VI) alrededor de 0 ppm. En la región de Al(VI), hay una señal clara a 14-15 ppm que está presente en los espectros el AMM[71]. En la región media, entre 20 y 30 ppm, el pico se asigna a un estado intermedio de cinco coordinaciones de aluminio, Al(V). Además, la señal entre 50 y 53 ppm pertenece a la especie Al(IV), y como se puede observar, esta especie predomina en el material inicial. Estas especies se encuentran dentro de la red de vidrio de aluminosilicato. Hay un desplazamiento ligeramente hacia 55.81 a 57 ppm en las pastas en la señal de Al(IV).

En las muestras de 6.5M, se observa un crecimiento continuo de la señal de Al(VI) a 0-45 ppm y una disminución simultánea de la fracción Al(IV), lo que puede sugerir una migración de aluminio desde la fase vítrea hacia una matriz MAA [71]. Las muestras de 4M también presentan señales en la región de Al(VI) (-14 a 15 ppm) [71].

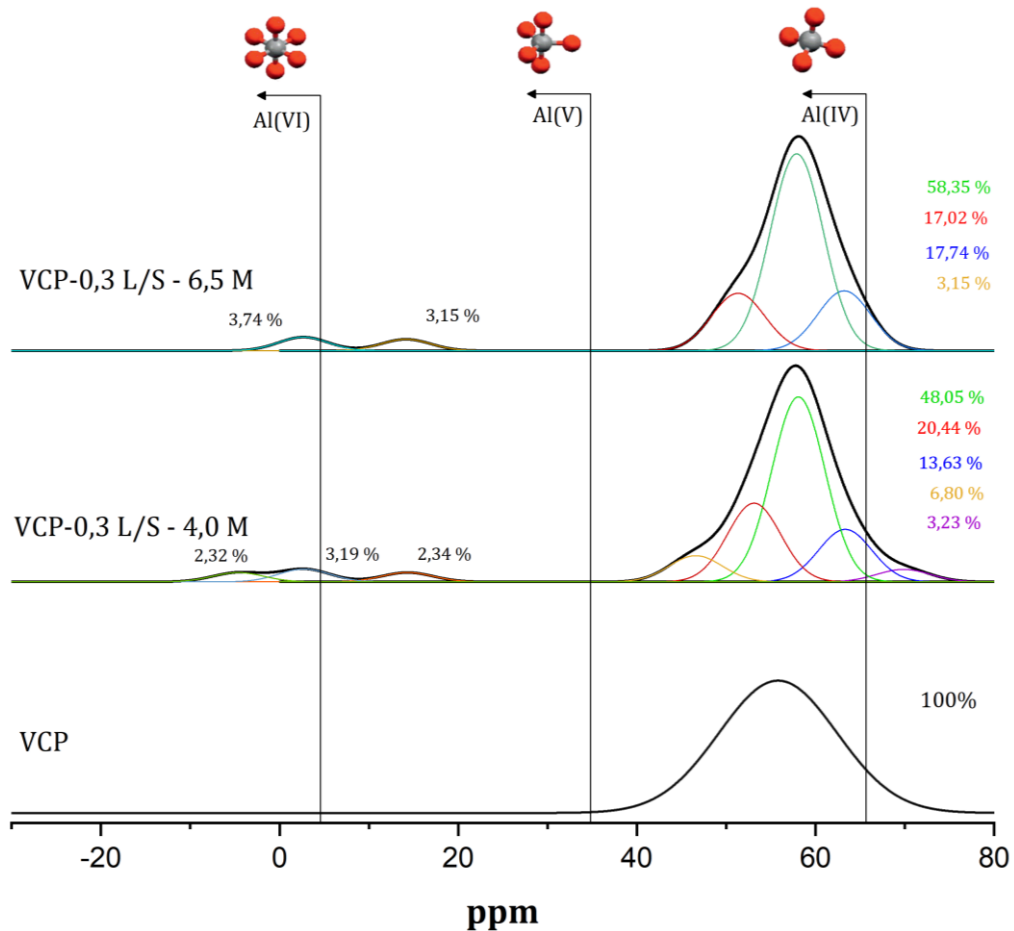


Figura 44. ²⁷Al MAS NMR deconvolución para las pastas V-C+P con L/S=0,3.

VII. Cambios en las estructuras de silicio ²⁹Si-RMN

Las interpretaciones del espectro se pueden definir de la siguiente manera: -60 a -82 ppm para Q⁰, -68 a -83 ppm para Q¹, -73 a -93 ppm para Q², -87 a -102 ppm para Q³ y -105 a -120 ppm para Q⁴. Los cambios a frecuencias más bajas se deben al aumento de la sustitución de Mg²⁺[72]. Estructuras mas específicas que se muestran en los gráficos se pueden encontrar explicadas en el Anejo 3 y Anejo 4.

De acuerdo con los límites generales establecidos por Marchand et al. 2018 y GaO et al. 2017, el subproducto V-C+P está compuesto principalmente por estructuras Q⁴ +4Al y Q⁴+2Al, con un 71% y un 29% respectivamente. Después de la activación alcalina, aparecen estructuras Q² y Q³, disminuyendo la cantidad de especies Q⁴ en todas las pastas. Los sitios Q²(1Al), Q²-b y Q²-p y se encuentran aproximadamente entre -81.6 ppm y 85.7 ppm.

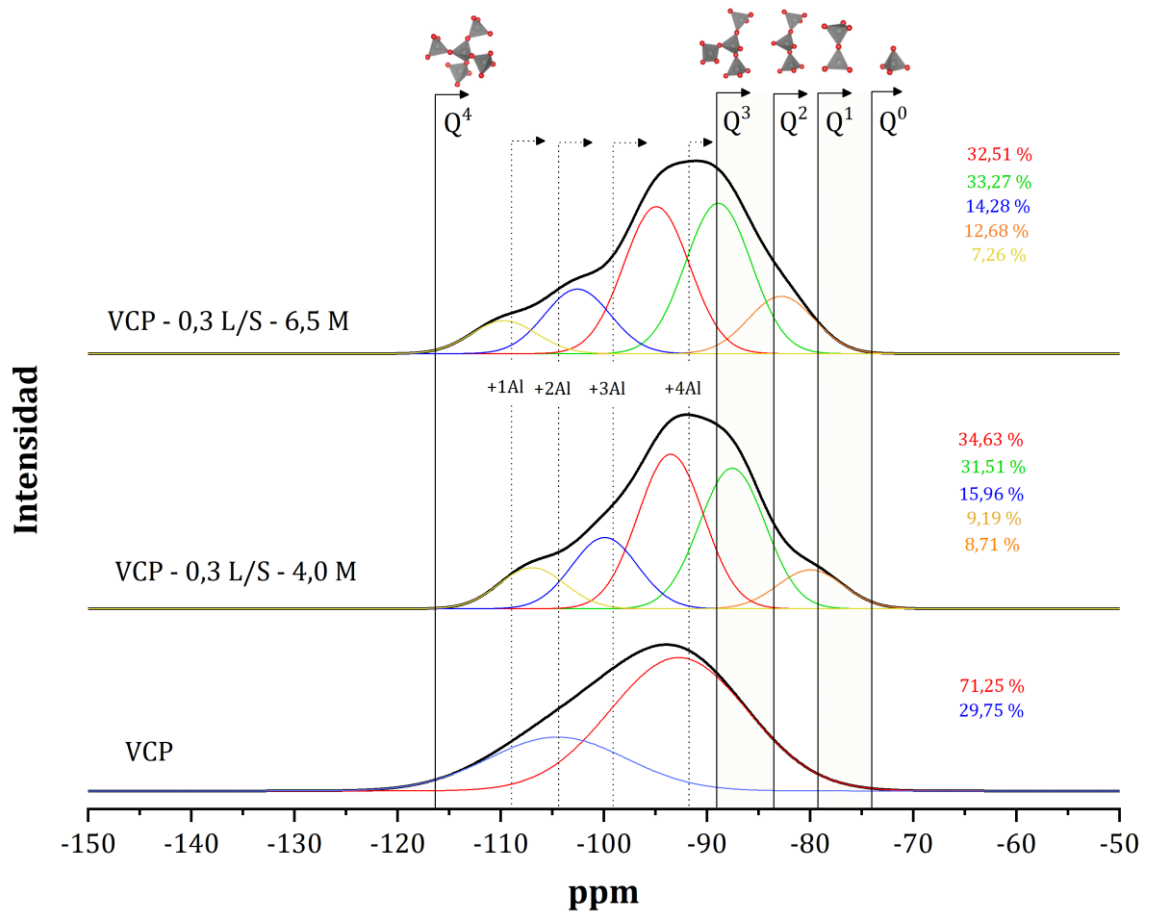


Figura 45. ²⁹Si MAS NMR deconvolución para para las pastas V-C+P con L/S=0,3.

Esos sitios Q² se asignan a los silicatos en la mitad de la cadena, con condiciones de enlace o emparejamiento dentro de los geles C-(A)-S-H [6]. Los compuestos en estas bandas aparecen en naranja con valores de 8,71 y 12,68% para las pastas 4M y 6,5 M respectivamente. Estos resultados se contrastarán con el procedimiento de extracción de fases CSH.

En las muestras de 4M, predominan las estructuras Q³ (50-53%) y hay una reducción importante en la cantidad de estructuras Q⁴ (9%) en comparación con la muestra original. La muestra 4.0M-0.30L/S contiene estructuras Q¹ que parecen reemplazar

algunas estructuras Q^2 . No se observa una tendencia clara en la influencia de la relación L/S en las pastas activadas 4M.

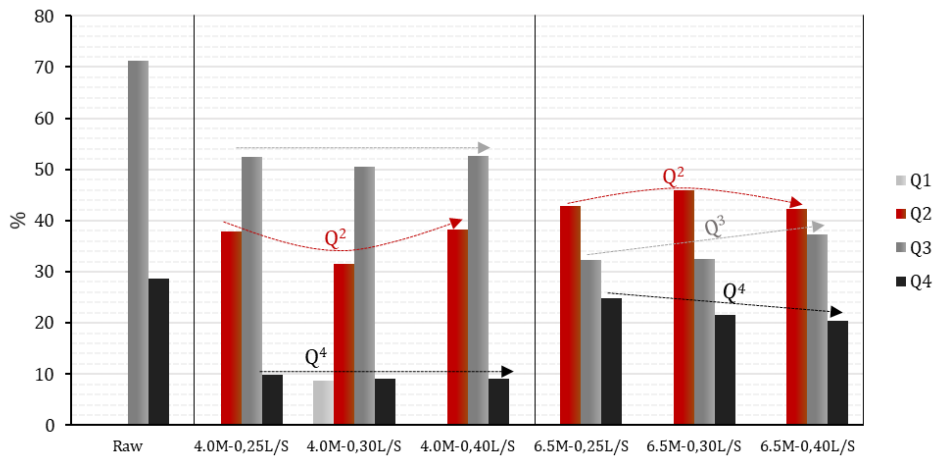


Figura 46. 29Si MAS Cuantificación de RMN de especies químicas de Si para las pastas de V-C+P con variación de la molaridad y la relación L/S.

Para las muestras de 6.5 M, predominan las estructuras Q^2 (42-46%), seguidas de las especies Q^3 y Q^4 . En este caso, hay una distribución igual de las estructuras Q^3 y Q^4 en comparación con las muestras de 4.0M. Las especies Q^4 disminuyen en relación a la relación L/S, mientras que las especies Q^3 aumentan, y no se observa una tendencia clara en las estructuras Q^2 .

Sumario

En conclusión, se puede decir que las estructuras de silicio bajan su grado de polimerización durante la activación alcalina mientras que las estructuras de aluminio lo aumentan. La relación L/S no tiene un efecto claro en las estructuras formadas.

La concentración de activador 6,5 M permite una formación de estructuras muy parecidas a las pastas activadas con solución 4M pero con valores ligeramente más negativos, que significa silicio menos polimerizado pero con más enlaces con el aluminio. En la tabla siguiente se

En cuanto a las estructuras de aluminio, para las pastas 6,5 M aparecen 5 bandas y dos de ellas aparecen en la franja de Al(VI) lo que indica una alta polimerización del aluminio. Para las muestras 4M aparecen 3 bandas adicionales una de las cuales se sitúa en el C-S-H.

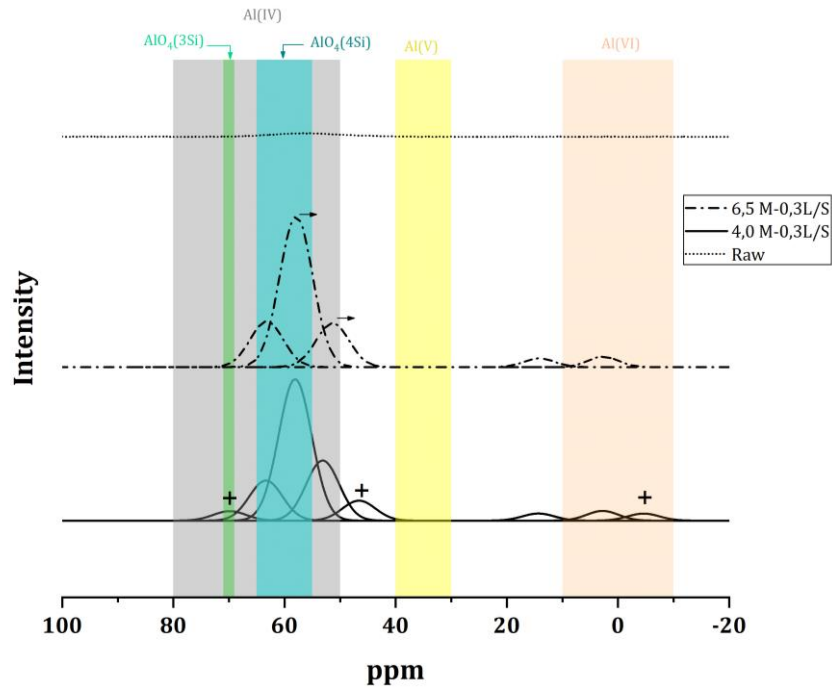


Figura 47. ²⁷Al MAS Comparación de los posibles compuestos generados para las pastas de V-C+P con variación de la molaridad y la relación L/S.

En la siguiente tabla se recoge una estimación de los porcentajes de C-S-H según lo presentado en el Anejo 4.

Pasta	C-S-H (%) - ²⁷ Al-RMN	C-S-H (%) - ²⁹ Si-RMN
P-0.25-4.0	7,76	8,93
P-0.30-4.0	8,74	8,71
P-0.40-4.0	8,34	7,99
P-0.25-6.5	2,64	9,86
P-0.30-6.5	3,74	12,68
P-0.40-6.5	3,72	7,64

Figura 48. Estimación del porcentaje de C-S-H según los datos RMN.

4.3.2.4 FT-IR

Todas las pastas de vidrio activadas mostraron números de onda (975 cm^{-1}) ligeramente más bajos que los observados en el espectro del vidrio sin activar (1000 cm^{-1}). Este hallazgo refleja la despolimerización de la red de sílice en los residuos de vidrio durante la activación alcalina. El cambio en el número de onda normalmente se asocia con la precipitación de un gel de sílice que incorpora los cationes Ca^{2+} y Al^{3+} en su estructura, ya que la sustitución de un ion Si^{4+} por un ion Al^{3+} desplaza la señal hacia frecuencias más bajas. La presencia de modificadores del sistema como los iones Na^+ también reduce la frecuencia de la banda [37].

La falta de picos agudos en el espectro del material sin activar indica la presencia de amorfismo o desorden en la red de silicato, lo cual concuerda con la amplia distribución de unidades de Qn presentes en estos vidrios [83]. Al realizar la activación alcalina, se observa un acentuamiento del pico representativo de las transformaciones del Si (1000 cm^{-1}) y de la señal ubicada en 1460 cm^{-1} , donde se encuentran los compuestos de calcio. Los cambios en esta última posición indican la meteorización y carbonatación de la pasta durante la preparación y el análisis [37].

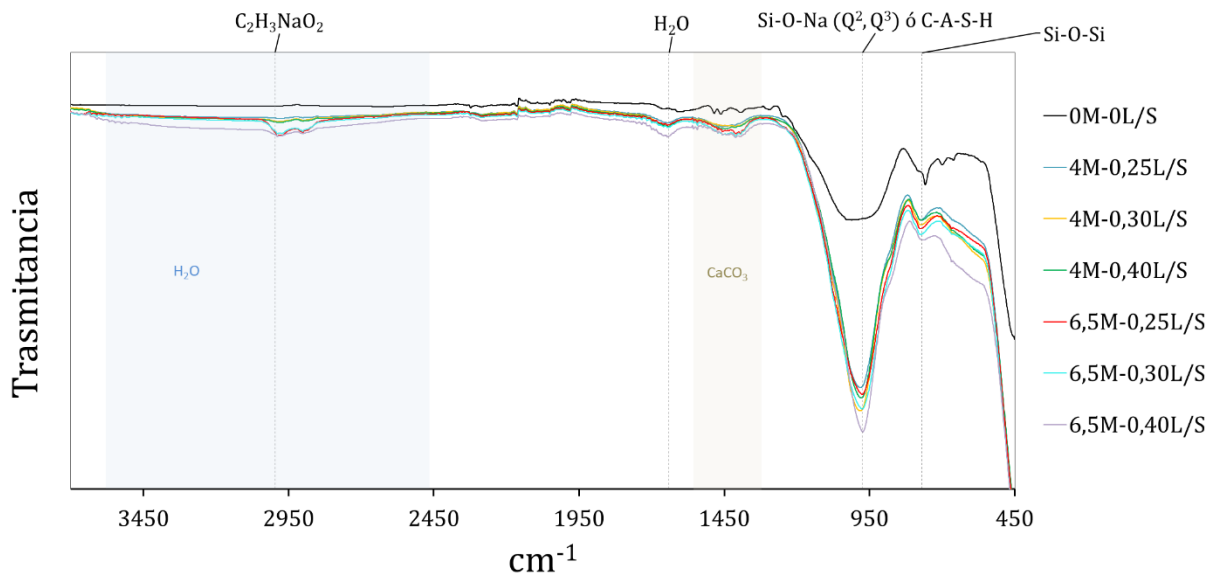


Figura 49. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P.

Teniendo en cuenta trabajos previos de activación alcalina de pastas que emplearon vidrio como precursor, se construyó una tabla que se puede encontrar en el Anejo 1 con los significados de las señales FT-IR. A partir de allí, se interpreta lo siguiente.

En la Figura 50 se presentan los espectros de las diferentes pastas para la señal ampliada en la banda 1000 cm^{-1} , donde se encuentra la mayor vibración de las bandas. En este punto, se encuentra el estiramiento asimétrico de los enlaces Si-O. Los silicatos con enlaces Si-OH, Si-O-Si y Si-O se encuentran entre 1000 y 1200 cm^{-1} . Las vibraciones correspondientes a silicatos de tipo Si-O-Na se identifican entre 950 y 1000 cm^{-1} . Estos últimos silicatos están asociados con unidades de silicatos de tipo Q^2 y Q^3 en la estructura. Se observa que el aumento de la molaridad del activador y la relación L/S desplaza la señal hacia valores más bajos de transmitancia.

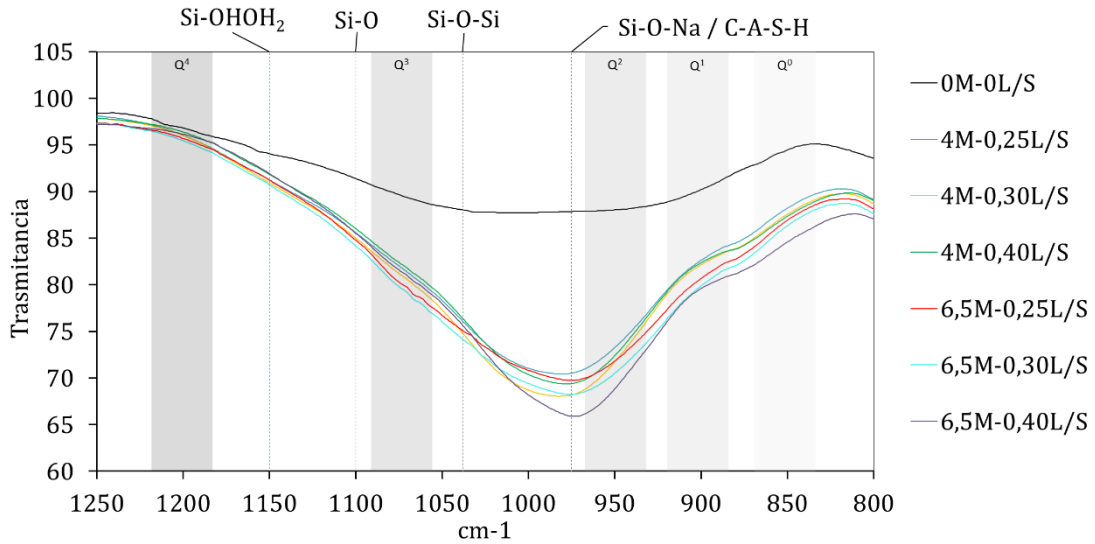


Figura 50. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P. Apliación de banda alrededor de los 1000 cm^{-1} . En la Figura 50 , las bandas alrededor de 750 cm^{-1} sugieren la presencia de estiramiento simétrico en los enlaces Si-O-Si. En la muestra sin activar, la señal es más clara y aguda, mientras que en las pastas activadas con una solución de 6.5M, la señal es menos aguda, lo que sugiere una disminución de estas estructuras con el aumento de la dosificación del activador. Un pequeño hombro ubicado en 1460 cm^{-1} se puede atribuir a grupos de carbonato presentes en el vidrio. El cambio de 735 (muestra 0M-0LS) a 785 cm^{-1} podría deberse al aumento de la sustitución de Mg^{2+} ocupando preferentemente posiciones Q^2 [72].

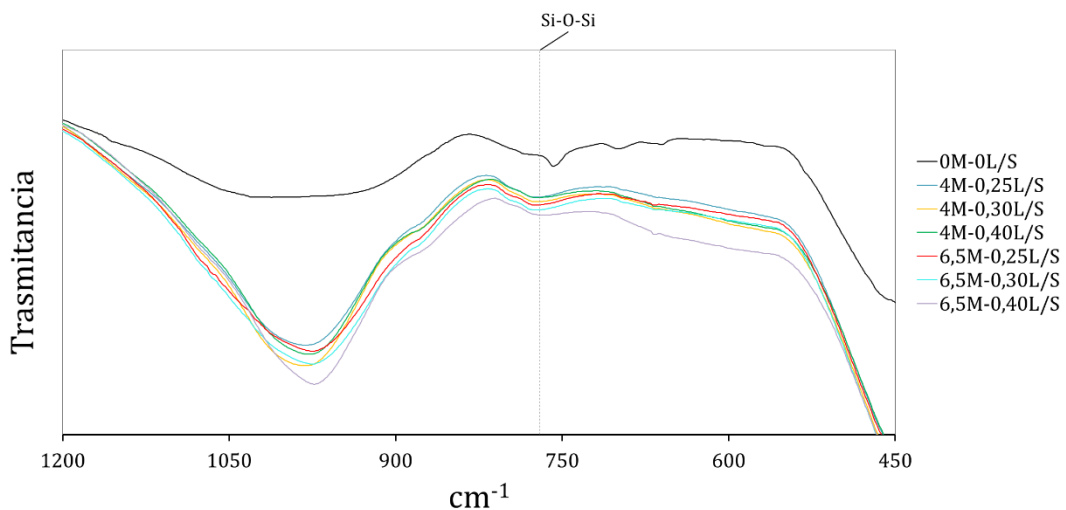


Figura 51. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P. Apliación de banda alrededor de los 450-1200 cm^{-1} .

Se pueden observar nuevas bandas de absorción en la pasta en las regiones entre 1630 y 1650 cm^{-1} , que corresponden a vibraciones de flexión en enlaces O-H-O, y una banda en la región entre 2300 y 3500 cm^{-1} centrada en 3485 cm^{-1} , que corresponde a vibraciones en los enlaces de moléculas de agua adsorbidas en la superficie o atrapadas en las cavidades de la estructura.

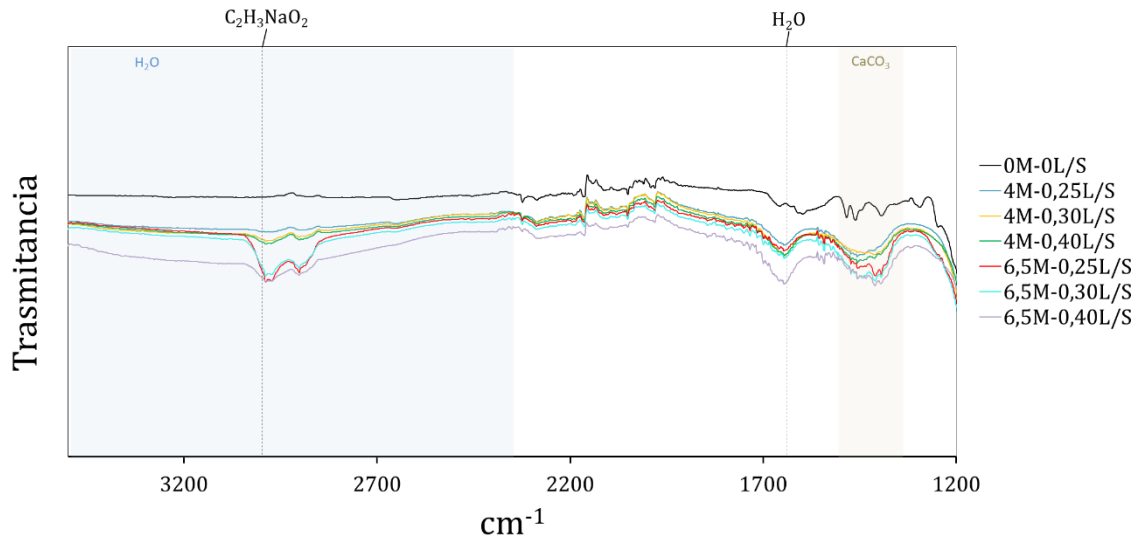


Figura 52. Resultados FT-IR para pastas de V-C+P. Apliación de banda alrededor de los 1200-3500 cm^{-1} .

Las bandas situadas en la región entre 1300 y 1500 cm^{-1} (centradas en 1384 y 1486 cm^{-1}) corresponden a vibraciones en enlaces C-O, que se atribuyen a la formación y presencia de carbonatos cálcicos y carbonatos sódicos a partir de la interacción de iones Na^+ y Ca^{2+} libres con el CO_2 presente en el ambiente [36].

Con el incremento de la relación L/S, se observa una mayor disolución, pero también aporta más agua libre (ver espectros de las muestras 0.4 L/S).

Sumario

El ensayo FT-IR aplicado a las pastas reveló que el aumento en la molaridad del activador y la relación líquido-sólido desplaza la señal hacia valores más bajos de transmitancia en comparación con el vidrio sin activar, lo que indica la despolimerización de la red de sílice durante la activación alcalina. Este cambio en el número de onda se asoció con la precipitación de un gel de sílice que incorpora cationes como Ca^{2+} y Al^{3+} en su estructura. Además, la presencia de iones Na^+ y otros modificadores de red redujeron la frecuencia de la banda.

La activación reveló picos característicos de Si-O-Na /C-A-S-H. Se identificaron varias estiramientos asimétricos de los enlaces Si-O, silicatos de tipo Si-O-Na, unidades de silicatos de tipo Q² y Q³. Otras bandas de absorción indicaron la presencia de estiramientos simétricos en los enlaces Si-O-Si, la presencia de grupos de carbonato en el vidrio y la formación de carbonatos cálcicos y sódicos. También se observaron vibraciones de flexión en enlaces O-H-O y vibraciones en los enlaces de moléculas de agua adsorbidas o atrapadas en las cavidades de la estructura.

En general, el incremento de la relación líquido-sólido en las pastas mostró una mayor disolución y aportó más agua libre, lo cual se reflejó en los espectros correspondientes.

4.3.2.5 Extracción de fases productos de reacción

Un problema usual en los espectros de RMN de ²⁹Si de los aluminosilicatos, es que tanto el precursor sólido como los productos de reacción muestran resonancias superpuestas que generalmente oscilan entre -70 y -120 ppm, asignándose a las unidades Q⁴(mAl), esos picos superpuestos dificultan el seguimiento de sus orígenes, por lo que el análisis cuantitativo solo puede proporcionar conclusiones cualitativas sobre los cambios estructurales y es imposible identificar la reactividad. Sin embargo, estudios previos demostraron una forma factible de separar los aluminosilicatos que reaccionaron mediante ataques químicos que permiten cuantificar el grado de reacción y los cambios de estructura de Si comparando los resultados de RMN de ²⁹Si de las muestras antes y después del tratamiento [6].

Los productos de reacción C-S-H, C-A-S-H y N-A-S-H poseen una estructura similar, con una matriz de gel amorfo y la presencia de aluminio y silicio en su composición. Sin embargo, existen diferencias significativas en su comportamiento químico y propiedades físicas. Mientras que el N-A-S-H presenta una mayor capacidad de intercambio iónico y una mayor reactividad química, el C-S-H y el C-A-S-H muestran una mayor estabilidad química y resistencia mecánica [84].

La extracción de las fases se llevó a cabo mediante un procedimiento de disolución con ácido salicílico y metanol (SAM). Este procedimiento permitió eliminar las fases de hidrato de silicato de calcio (geles C-S-H y C-A-S-H) de las pastas [38].

Extracción de C-S-H y C-A-S-H.

El proceso consistió en añadir 1 g de muestra molida y tamizada (<0.07 mm) a una solución de ácido salicílico (6 g) y metanol (40 ml), y agitar durante 1h [23]. Posteriormente, se filtró la solución utilizando un filtro de celulosa con un tamaño de poro de 20 μ m. Luego de esto, se lavó el residuo insoluble con metanol y se dejó secar hasta alcanzar un peso constante. Finalmente, se pesó el residuo insoluble para determinar el porcentaje de pérdida de peso.

Extracción de los productos de reacción

La extracción consistió en agitar 1 g de pasta triturada y tamizada (<0.07 mm) con 250 mL de solución de HCl (1:20) durante 3 h, seguido de filtración (filtro con tamaño de poro de 20 μ m). Luego, se lavaron los residuos insolubles con agua desionizada y se dejaron secar hasta peso constante. El porcentaje de pérdida de peso se determinó por diferencia de peso. Este proceso de extracción disuelve los productos de reacción formados en la activación alcalina ("precursor de zeolita" y zeolitas cristalinas), pero no el material sin reaccionar [85].

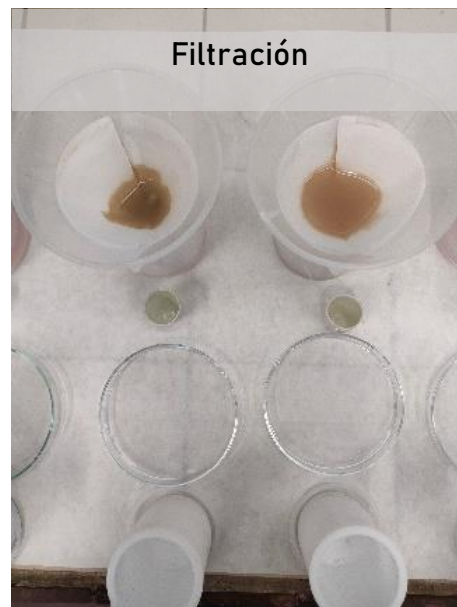




Figura 53. Procedimiento de extracción de C-S-H, C-A-S-H y N-A-S-H.

Se calcula el porcentaje de productos C-S-H, C-A-S-H o los productos de reacción generados durante la activación mediante el cálculo del grado de reacción (α) y el residuo insoluble (IR)

Ecuación 1.

$$IR (\%) = (P_{\text{final}} / P_{\text{inicial}}) \times 100$$

Ecuación 2.

$$\alpha (\%) = 100 - IR (\%)$$

Donde:

P_{inicial} = peso inicial de la muestra,

P_{final} = peso final del residuo insoluble que permanece después del procedimiento

IR= es el porcentaje de precursor sin reaccionar (residuo insoluble)

α = porcentaje de productos de reacción (grado de reacción).

Resultados

En términos generales, los resultados muestran que las pastas fabricadas con el precursor V-C+P tienen un contenido de los productos de reacción mayor que los compuestos C-S-H y C-A-S-H.

El principal aporte de las fases C-(A)-S-H disueltas en polvo de WBA probablemente proviene del contenido de calcio proporcionado por la cerámica del precursor. Los resultados de la extracción con HCl muestran que los aumentos en la concentración de

NaOH de los MAA resultaron en un aumento en la masa disuelta. La extracción química selectiva con HCl condujo a la disolución de las fases de carbonato de calcio y sodio, geles de aluminosilicato de sodio y zeolitas, así como las fases C-(A)-S-H, lo que condujo a la eliminación de Ca²⁺ y dejó sílice gel como residuo insoluble. Los resultados de la extracción con HCl indican que a mayor concentración de NaOH, mayor masa disuelta. Este hecho se debe a la formación de geles C-A-S-H, como se demostró en la extracción con SAM, así como a una mayor presencia de fases de carbonato de sodio a medida que se incrementó la dosis de álcali.

Figura 33. Resultados de extracción de fases de calcio (C-S-H y/o C-A-S-H) en el ataque con ácido salicílico/metanol y extracción de los productos de reacción en el ataque ácido en pastas de V-C+P.

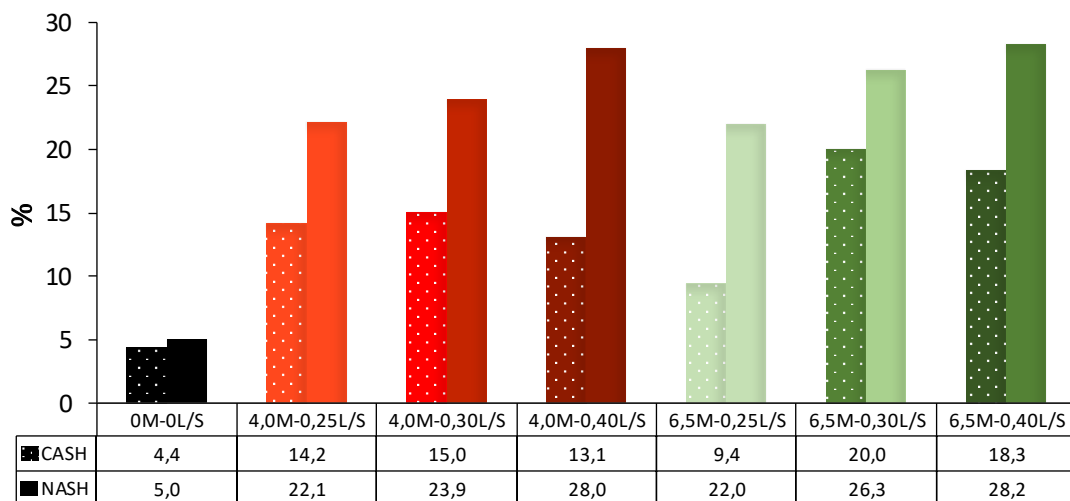


Figura 54. . Resultados de extracción fases de calcio (CSH y/o CASH) en el ataque con ácido salicílico /metanol y extracción de fases reactivas en el ataque ácido en pastas de V-C+P.

Tabla 36. Extracción de fases.

Tipo de pasta	CSH y/o CASH (wt. %)	Fases reactivas (wt. %)	Posible NASH (wt. %)
<i>P-0M-0L/S</i>	4,4	5,0	0,6
<i>P-4.0M-0.25 L/S</i>	14,2	22,1	7,9
<i>P-4.0M-0.30 L/S</i>	15,0	23,9	8,9
<i>P-4.0M-0,40 L/S</i>	13,1	28,0	14,9
<i>P-6.5M-0.25 L/S</i>	9,4	22,0	12,6
<i>P-6.5M-0.30 L/S</i>	20,0	26,3	6,3
<i>P-6.5M-0.40L/S</i>	18,3	28,2	9,9

En el análisis ^{29}Si -RMN aparece posible contenido de C-S-H con valores de 8,71 y 12,68% para las pastas 0,3 L/S-4M y 0,3 L/S-4M 6,5 M respectivamente. Estos son inferiores pero congruentes con .

El ataque ácido descompone la estructura original del MAA y sus productos de reacción, así como los geles tipo N-A-S-H u otras fases reaccionadas, dejando como único residuo insoluble los productos sin reaccionar[6].

Investigaciones anteriores muestran que el porcentaje de masa disuelta por la extracción con SAM en pasta OPC es de alrededor del 84% debido a su composición basada en fases C-S-H [86]. En sistemas con cenizas volantes ($\text{CaO}=2.72\%$) activadas con NaOH, el porcentaje de reacción atribuido a N-A-S-H puede variar entre el 28% y el 34% con soluciones alcalinas entre 8 y 10 M [87].

Es posible que algunos de los Ca^{2+} químicamente ligados al gel C-A-S-H se sustituyan por Na^+ , lo que da lugar a la formación de un gel N-A-S-H cuando se activa un material con NaOH y silicatos sódicos. Igualmente, se ha observado la presencia de geles de tipo N-A-S-H en la zona de transición interfacial en precursores con un bajo contenido de Ca/Si [87].

Sumario

Los resultados indican que con el aumento de la molaridad se presentan cambios asociados a las transformaciones del Si-O-Si hacia unidades Si-O-Na. La disminución de la transmitancia puede deberse al aumento de la sustitución de Mg^{2+} y la presencia de Na^+ . Estas sustituciones de los modificadores de red contribuyen a la sustitución de Si por cationes Ca^{2+} y Al^{3+} .

Es posible que algunos de los Ca^{2+} químicamente ligados al gel C-A-S-H se sustituyan por Na^+ , dando lugar a la formación de un gel N-A-S-H.

4.4 OPTIMIZACIÓN DEL MAA BASE (V-C+P)

4.4.1 Temperatura de curado

Hasta el momento se ha empleado curado térmico en todos los especímenes para alcanzar la resistencia. En el próximo procedimiento se evalúa el efecto de la temperatura de curado en matrices de pasta y mortero.

4.4.1.1 Procedimiento

Para determinar la influencia de la temperatura de curado, se prepararon muestras curadas a 21° C, 40° C, 70° C y 100° C. Las muestras se sometieron a ensayos de flexión y compresión a los 28, 70 y 160 días. La dosificación de las muestras se muestra en la Tabla 11. La relación A/P fue de 0.38, la relación L/S fue de 0.19 para los morteros, y la solución fue de 5 M. Se fabricaron tres vigas de 40x40x160 mm para cada dosificación de pasta y seis para cada dosificación de mortero para cada temperatura de curado (21°C, 40°C, 70°C y 100°C).

Figura 55. Preparación y muestras finales curadas a diferente temperatura después de 48h.



Tabla 37. Dosificación para muestras para ensayo de evaluación de la temperatura de curado.

Matriz	PRECURSOR (g)	AGUA (g)	ARENA (g)	ACTIVADOR (g)	WG (ml)
<i>Pastas</i>	2400	920	-	200	24
<i>Morteros</i>	1200	460	1200	100	12
<i>Materiales</i>	V-C+P	Destilada	Normensand	NaOH PanReac® pellets	EssentQ®

4.4.1.2 Resultados

Los resultados de resistencia mecánica de pastas y morteros se presentan en la Figura 56 y la Figura 58 respectivamente. A partir de los resultados, se puede observar que existe una relación directamente proporcional entre la temperatura de curado y la resistencia mecánica.

Pastas

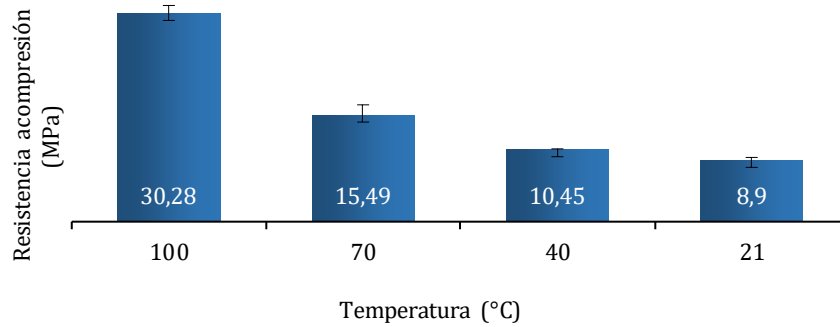


Figura 56. Resultados del efecto de la temperatura de curado en la resistencia mecánica para pastas de V-C+P a los 28 días.

Las pastas alcanzaron su resistencia máxima a la compresión con una temperatura de curado de 100°C, al igual que los morteros hasta los 70 días. Sin embargo, como se muestra en la Figura 57, las muestras curadas a 100 grados presentaron fisuras visibles y, además, las pastas presentaron curvatura en la sección longitudinal. Debido a esto, algunas muestras tuvieron que ser descartadas e incluso se repitieron los ensayos de pastas para obtener los datos de resistencia presentados.

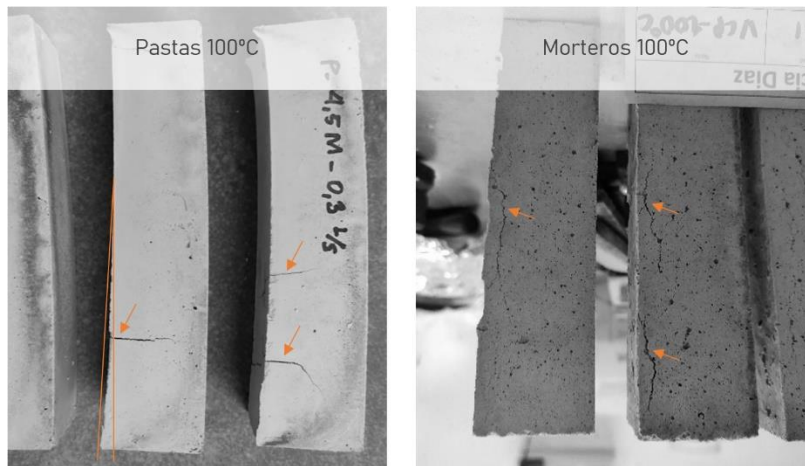


Figura 57. Evidencia de fisuras y deformaciones de muestras curadas a 100°C.

Los valores de resistencia a la compresión de las pastas son notablemente mayores que los de los morteros. Al comparar la resistencia a la compresión en pastas y morteros a los 28 días, se encuentra que las pastas tienen un 44% y un 80% más de resistencia, respectivamente, para el curado a 70°C y 100°C.

Morteros

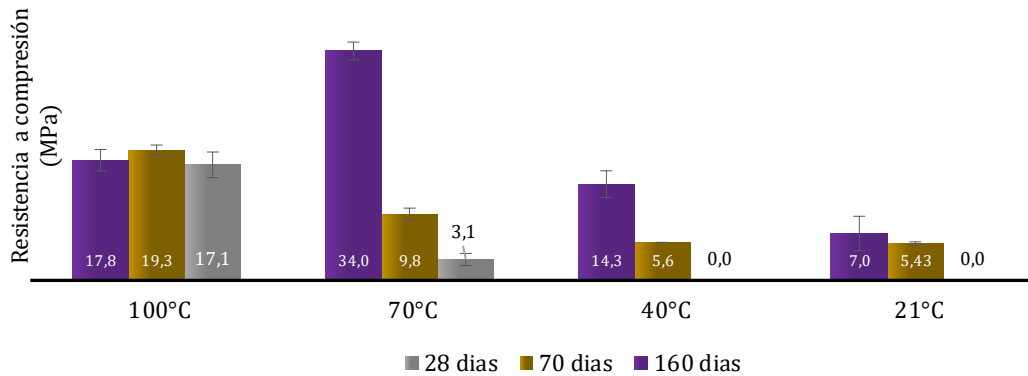


Figura 58. Resultados del efecto de la temperatura de curado en la resistencia mecánica de los morteros.

Para los morteros, fue necesario realizar ensayos a los 70 y 160 días debido a que las muestras no fraguaron después de 28 días. En las mezclas con cemento Portland, generalmente se realizan ensayos a los 28 días, ya que a esa edad se alcanza la resistencia final del material. En el caso de los morteros de MAA fabricados, se observa un incremento de hasta el 71% en la resistencia entre los 70 y los 160 días para la temperatura de curado de 70°C.

Los morteros curados a 70° C presentaron un desarrollo lento de la resistencia final. A los 28 días, solo alcanzaron un 20% de su resistencia final, a los 70 días un 29% y de los 70 a los 160 días se registró un aumento del 71%. El valor de resistencia a los 160 días en las muestras curadas a 21° C, 40° C y 70° C no necesariamente corresponde a la resistencia final, ya que podría ser mayor con un tiempo de curado más prolongado. Aunque los resultados de resistencia podrían ser más favorables en un periodo de tiempo mayor, un periodo de curado de 70 días es muy largo para una implementación real. Por lo tanto, es conveniente mejorar el diseño de la mezcla o cambiar las condiciones para lograr resistencias mayores a los 28 días.

Las muestras de mortero curadas a 100° C fueron las que alcanzaron más rápidamente su resistencia final. Dichas muestras alcanzaron un 89% de la resistencia final a los 28 días, alcanzaron el valor máximo a los 70 días y experimentaron una reducción del 8% a los 160 días. Las muestras a 100° C fueron las únicas que presentaron una disminución de la resistencia con la última edad de curado.

Los resultados de la evolución significativa de la resistencia en largos periodos de curado coinciden con investigaciones previas que sugieren la evaluación mecánica a más de 28 días [88].

4.4.1.3 Sumario

La temperatura de curado optima fue de 70° C. Al emplear temperaturas inferiores se alcanza una resistencia a la compresión menor de 6 MPa a los 48 días. Al emplear temperaturas más altas, se presenta un rápido fraguado pero el elemento final presenta fisuras y deformaciones que terminan reduciendo la resistencia del material luego de los 70 días.

4.4.2 Finura

La finura desempeña un papel crucial en la disolución del material y, por ende, en la formación de compuestos que contribuyen a la resistencia mecánica. En la presente campaña experimental, se prepararon distintos morteros con diferentes niveles de finura para evaluar su impacto en la resistencia mecánica.

4.4.2.1 Procedimiento

Las muestras se prepararon utilizando una relación activadora/precursor de 0,5. La solución activadora consistió en una solución de NaOH PanReac® con una concentración de 4,5 M y una pureza del 98%. El agregado fino utilizado fue arena silícea con una granulometría de 0,3/0,4, en una proporción de 1:1 con respecto al precursor. Además, se añadió carbonato de calcio BetoFlow® D - CL con un tamaño de partícula de 63 µm en una proporción de 0,1:1 con respecto al precursor. Se fabricaron especímenes de 4 mm x 4 mm x 16 mm para evaluar la resistencia a la compresión y a la flexión después de 46 días.

4.4.2.2 Resultados

La resistencia a la compresión y a la flexión, así como su relación, se ven afectadas por el tamaño de partícula. En la Figura 57 se puede observar que las muestras muestran un aumento en la resistencia a la compresión (R_c) y a la flexión a medida que se reduce el tamaño de partícula. Por otro lado, el porcentaje de la resistencia a la flexión en comparación con la resistencia a la compresión disminuye a medida que el tamaño de partícula se reduce, lo que indica que el material se vuelve más resistente pero también más frágil con partículas más finas.

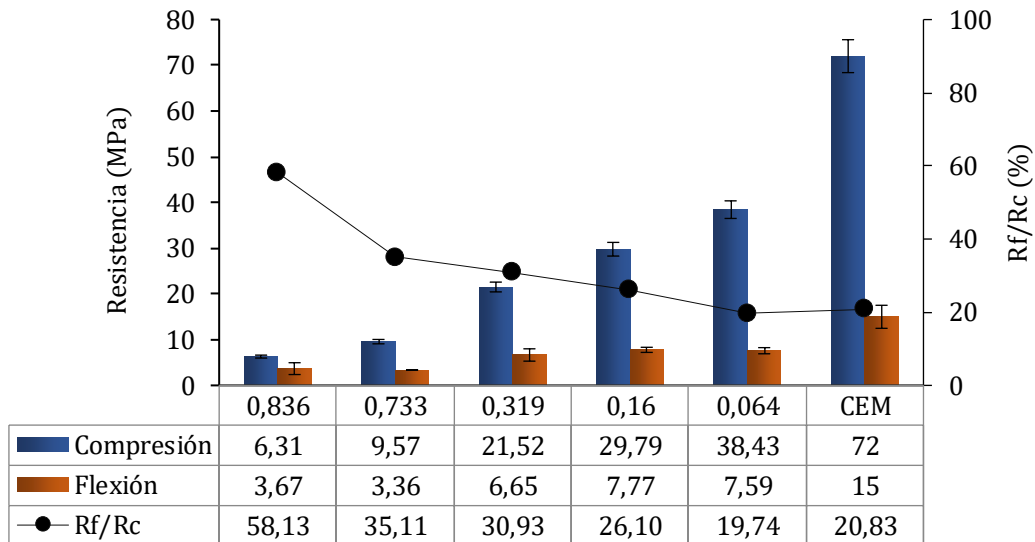


Figura 59. Resultados del efecto de la finura en la resistencia mecánica.

En cuanto al flujo, se observa una disminución del mismo hasta alcanzar un tamaño de partícula de 0,319 mm, seguida de un aumento en tamaños de partícula más pequeños. Esto puede atribuirse a los cambios en la absorción del material y al tipo de partícula microscópica presente en el vidrio. En investigaciones anteriores, se ha atribuido el aumento en el flujo de los MAA frescos cuando se incorpora vidrio molido a la superficie lisa del vidrio [89].

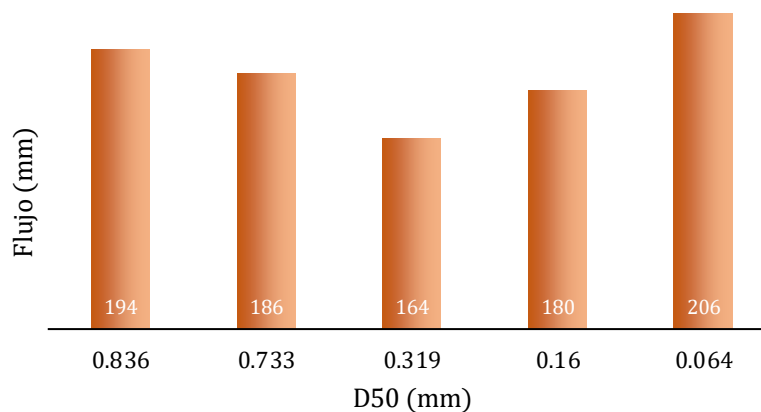


Figura 60. Fluidiz de los morteros expresados en mm.

Las partículas de vidrio molido tienen una morfología irregular con partículas alargadas, de cara plana y predominantemente lisas [36]. Los resultados se presentan en la Figura 60.

4.4.2.3 Sumario

En conclusión, el tamaño mínimo de partícula del material es un parámetro de gran importancia para la resistencia mecánica. En el caso del precursor V-C+P, se requiere un tamaño medio de partícula de 0,3 mm para alcanzar una resistencia superior a 20 MPa.

4.4.3 Incorporación de aditivos

El MAA desarrollado en este trabajo de investigación está diseñado para ser utilizado en elementos prefabricados con espesores inferiores a 10 cm y con fibras. En estos hormigones, es importante lograr una mezcla fluida e incluso autocompactante. Para obtener una consistencia fluida sin aumentar el contenido de agua, en el hormigón convencional se emplean plastificantes y/o superplastificantes.

En esta etapa, se verificó la efectividad del plastificante y se evaluó la variabilidad del comportamiento reológico. Para ello, se realizaron pruebas con la incorporación de este tipo de aditivo y, ante los resultados desfavorables, se utilizó un aditivo experimental recomendado por una empresa colaboradora. Durante los ensayos, se comparó la variación del flujo tanto para un mortero de referencia con cemento como para la mezcla activada alcalinamente con V-C+P y los dos tipos de aditivos.

4.4.3.1 Procedimiento

En las mezclas de la campaña experimental de esta sección, se empleó el aditivo superplastificante (Ad(SP)) Master Glenium ASE 425 con una dosificación del 0,125%, 0,25% y 0,5% en peso de cemento.

Para las mezclas de mortero con V-C+P, se utilizaron cuatro mezclas con aditivo Ad(SP) en proporciones de 0,5%, 0,8%, 1,5% y 3,0% en peso de V-C+P, y otras cuatro mezclas con aditivo dispersante experimental (Ad(EX)) en las mismas proporciones. El nombre del aditivo dispersante experimental se mantiene en anonimato por parte de la empresa suministradora. Este aditivo se basa en copolímeros catiónicos. La dosificación recomendada del Ad(EX) es de entre el 0,5% y el 2,0% del peso de la suma de los cementantes inorgánicos [90].

Se prepararon también muestras sin aditivo tanto para las mezclas con cemento como para las mezclas con V-C+P.

Las proporciones de mezcla se muestran en la siguiente tabla:

Muestra	Cemento (g)	Solución Alcalina (g)	Precursor (g)	H ₂ O (g)	Filler (g)	Arena (g)	Ad(SP) (% pc*)	Ad(EX) (% pc*)
<i>CEM-Ad(SP)-0</i>	800	0		291,2	360	480	0	0
<i>CEM-Ad(SP)-0,125</i>	800	0		291,2	360	480	0,125	0
<i>CEM-Ad(SP)-0,25</i>	800	0		291,2	360	480	0,25	0
<i>CEM-Ad(SP)-0,5</i>	800	0		291,2	360	480	0,5	0
<i>V-C+P-Ad(SP)-0</i>	0	320	800	0	360	480	0	0
<i>V-C+P-Ad(SP)-0,5</i>	0	320	800	0	360	480	0,5	0
<i>V-C+P-Ad(SP)-0,8</i>	0	320	800	0	360	480	0,75	0
<i>V-C+P-Ad(SP)-1,5</i>	0	320	800	0	360	480	1,5	0
<i>V-C+P-Ad(SP)-3,0</i>	0	320	800	0	360	480	3	0
<i>V-C+P-Ad(EX)-0,5</i>	0	320	800	0	360	480	0	0,5
<i>V-C+P-Ad(EX)-1,8</i>	0	320	800	0	360	480	0	0,75
<i>V-C+P-Ad(EX)-1,5</i>	0	320	800	0	360	480	0	1,5
<i>V-C+P-Ad(EX)-3,0</i>	0	320	800	0	360	480	0	3

Ad(SP)=Superplastificante basado en policarboxilatos
 Ad(EX)= Aditivo experimental basado en copolímeros catiónicos.
 * %pc = Porcentaje con respecto al cementante.

4.4.3.2 Resultados

La Figura 61 muestra los resultados de la variación del flujo en las mezclas ensayadas. Se puede observar que la variación del flujo sigue un comportamiento no lineal. En el caso de las mezclas con cemento y Ad(SP), la dosificación óptima para alcanzar el flujo máximo fue del 0,5%. Con esta dosificación, la mezcla se hizo tan fluida que ocupó el diámetro máximo de la mesa de flujo (380 mm). El incremento máximo entre el 0% y el 0,5% de Ad(SP) en las muestras con cemento fue del 116,1%. Bajo las condiciones estudiadas, se puede afirmar que con el superplastificante en una mezcla de cemento se obtiene una tasa de fluidez de 0,0024% de Ad(SP) por cada mm.

En el caso de las muestras con V-C+P y ambos aditivos, el flujo aumentó muy poco entre la dosificación del 1,5% y el 3%. En las mezclas de mortero con Ad(SP), hubo un aumento de la fluidez de solo el 7,5%, pasando de 168,6 mm a 181,1 mm. Esto corresponde a una tasa de 0,24% de aditivo por cada 1 mm de fluidez. Al incorporar el Ad(EX), se observó un aumento del 31,9% en la fluidez entre el 0% y el 3% de aditivo. Aunque hubo un incremento mayor, la tasa de fluidez estimada fue de 0,053% de aditivo por cada 1 mm de fluidez.

Mezcla	Flujo (mm)		Extensión máxima (mm)		Índice de flujo: Gramos de Aditivo para 1 mm de flujo
	Inicial	Máximo	mm	%	
CEM+Ad(SP)	175,81	380,00	204,19	116,14	0,024
V-C+P+Ad(SP)	168,56	181,14	12,58	7,46	2,384
V-C+P+Ad(EX)	168,56	225,19	56,63	31,91	0,530

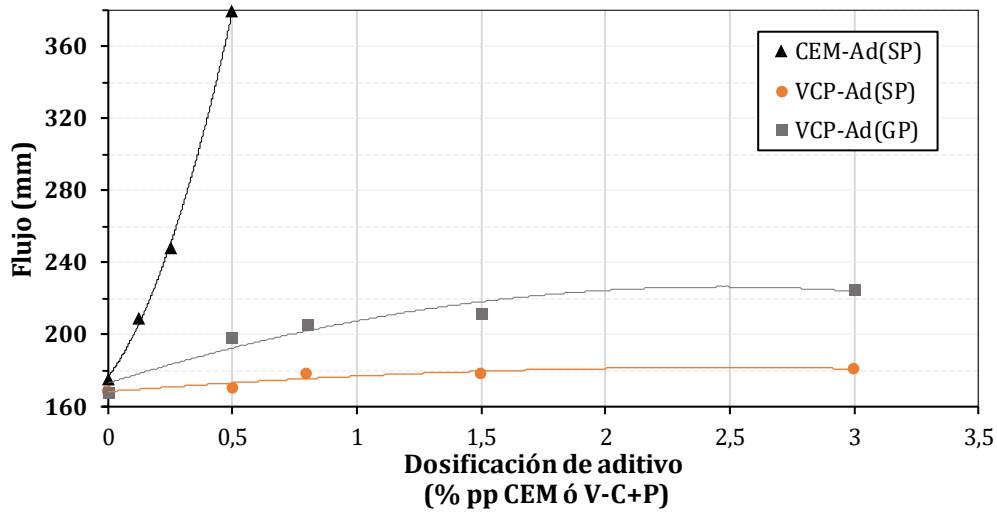


Figura 61. Resultados de ensayos de flujo para morteros con Aditivos As(SP) y Ad(EX).

En cuanto a la resistencia de las muestras, se encontró una reducción de hasta el 42% y el 65% en la resistencia a la compresión con el uso de Ad(SP) y Ad(EX), respectivamente, por encima del 0,5% en peso. La resistencia a la flexión se redujo en un 50% y un 39% con el uso de Ad(SP) y Ad(EX), respectivamente. Estas tendencias se pueden observar en la Figura 62.

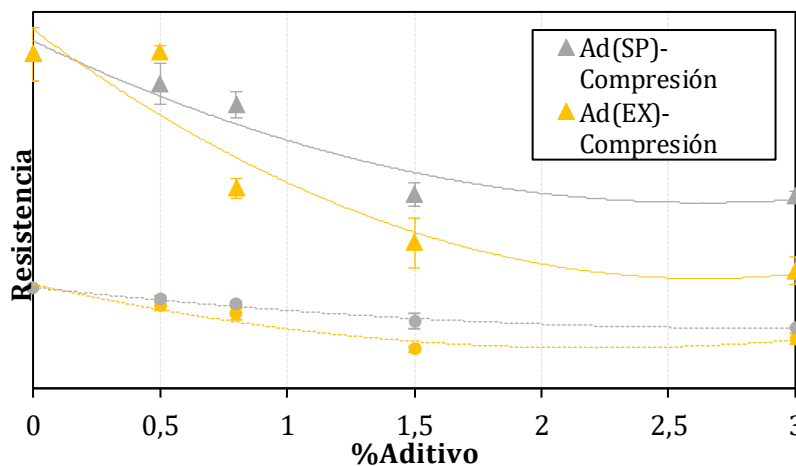


Figura 62. Reducción de la resistencia en morteros con precursor V-C+P y diferente dosificación de Ad(SP) o Ad(EX).

4.4.3.3 Análisis

Investigaciones anteriores han demostrado la disminución de la efectividad de los plastificantes [91], ya que la adsorción del superplastificante depende en gran medida de la composición química de la molécula de cemento y, especialmente, de la concentración de iones de calcio presentes en su superficie [92].

En el estudio de Ibrahim y Meawad (2022), se ha demostrado una disminución en el potencial zeta (cercano a 0 mV) a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del polvo de vidrio en el cemento. La carga en la superficie de las partículas de vidrio afecta significativamente el comportamiento de adsorción del superplastificante en las partículas de cemento.

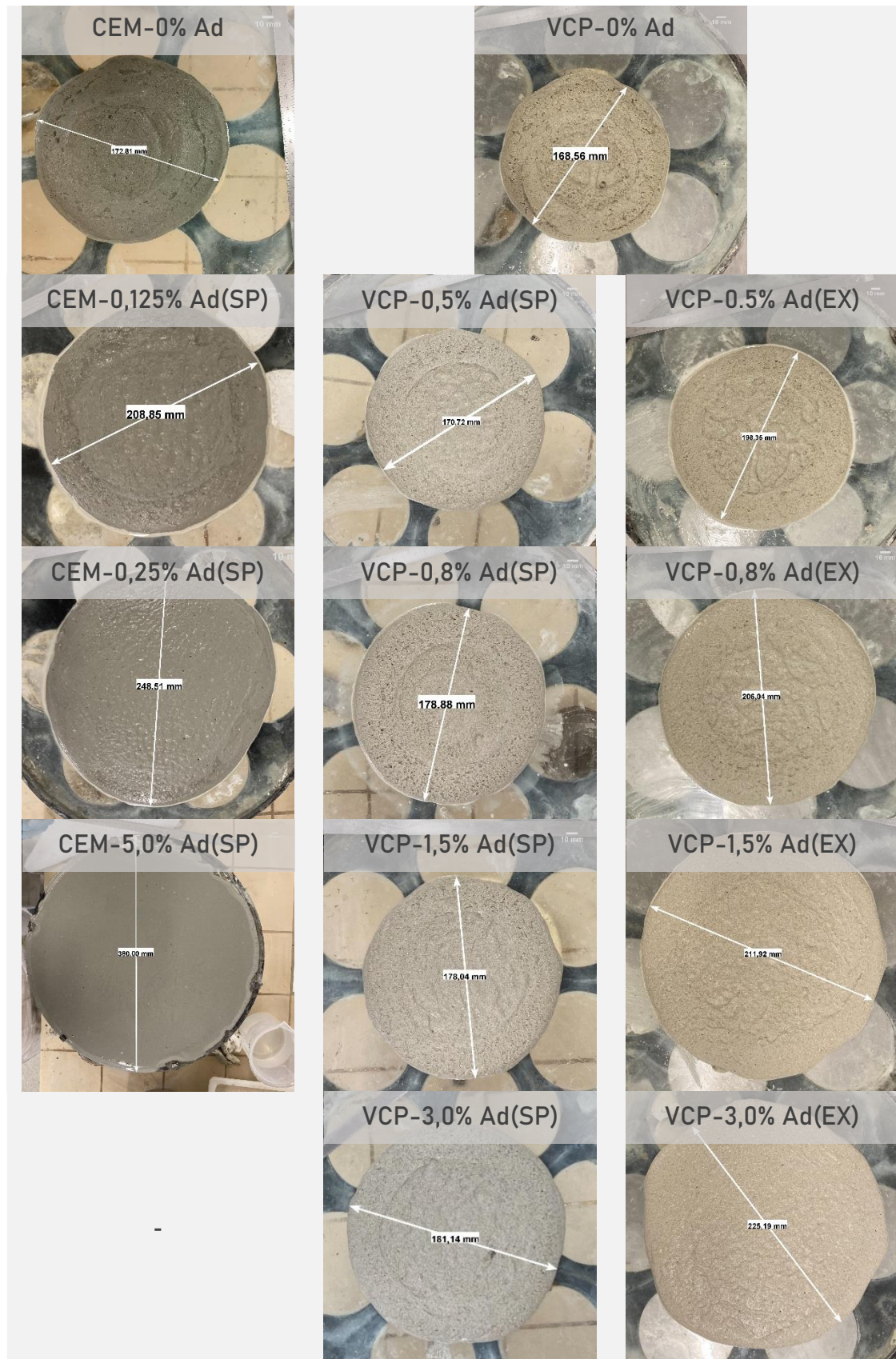
En el capítulo 3 de esta tesis, se puede observar que el precursor V-C+P contiene solo un 2% de calcio, mientras que el cemento contiene un 66% [93]. Con esto en cuenta, se incluyó el filler calizo (CaCO_3 97,5%) con el objetivo de aportar iones Ca^{2+} generados por su disolución en medio alcalino y permitir una mayor dispersión en la mezcla. Sin embargo, debido a la baja eficiencia encontrada con el superplastificante, es posible que no se haya logrado una disolución suficiente de los iones necesarios para fluidificar la mezcla.

En cuanto al activador alcalino, el alto nivel de alcalinidad requerido para la activación también implica una alta carga de sales (Na de la solución de NaOH), lo que puede anular el efecto de dispersión que sí es posible en niveles de pH más bajos [90]. El activador rompe los enlaces del precursor V-C+P y genera iones silanol y silato (O-Si-) que repelen los iones negativos del superplastificante [94].

En base a lo anterior, se pueden concluir los siguientes mecanismos de funcionamiento para los dos tipos de aditivos empleados:

En los superplastificantes a base de policarboxilatos, los grupos ácidos cargados negativamente (anión) están diseñados para adsorberse en la superficie de las partículas de cemento, que tienen una carga positiva debido a los iones de calcio presentes. La formación de una doble capa electrostática resulta en una repulsión electrostática entre las partículas, lo que hace que la mezcla sea más fluida. Sin embargo, en un MAA, los precursores no tienen los mismos niveles de calcio presentes en el cemento. Además, el alto nivel de alcalinidad y la alta carga de sal en la solución de NaOH anulan el efecto de dispersión.

Figura 63. Ensayos de flujo para morteros con Ad(SP) y Ad(EX).



A pesar de que los aditivos con copolímeros catiónicos son más estables a valores de pH altos y están diseñados para geopolímeros, las partículas de vidrio como el precursor empleado en esta sección (V-C+P) suelen tener una superficie cargada negativamente debido a que solo poseen un 2% de calcio en su estructura y a la presencia de grupos funcionales con carga negativa.

La Figura 63 muestra las diferentes mezclas realizadas, mientras que la Figura 43 presenta el comportamiento de las mediciones reológicas, comparando la resistencia al corte máxima y mínima en el tiempo.

4.4.3.4 Sumario

En conclusión, se puede afirmar que, al utilizar un superplastificante a base de policarboxilatos, solo se logra un aumento del 7% en el flujo de las mezclas con V-C+P con una dosificación máxima de entre el 1,5% y el 3,0% de aditivo. En cambio, con un aditivo a base de copolímeros catiónicos, se puede mejorar el flujo hasta un 32% con una dosificación entre el 1,5% y el 3,0%. En una mezcla con cemento como aglomerante, se requiere aproximadamente 0,024 g/kg de cemento para generar 1 mm de flujo, mientras que en una mezcla equivalente con V-C+P como precursor se necesitan 2,4 g/kg de superplastificante a base de policarboxilatos y 0,53 g/kg de aditivo dispersante a base de copolímeros catiónicos para obtener 1 mm de flujo.

Por otro lado, se observa una caída de la resistencia mecánica se dedujo entre un 39 y un 65% con la incorporación de los aditivos en el MAA.

Es importante tener en cuenta que estas conclusiones se basan en las proporciones experimentales y que los porcentajes estimados pueden variar si se modifican parámetros como la finura del material V-C+P. Sin embargo, es posible afirmar que los aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos pierden eficiencia en una mezcla de MAA de V-C+P, mientras que un aditivo con copolímeros catiónicos funciona mejor con este tipo de mezclas.

4.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4

Luego de la evaluación experimental de los diferentes materiales bajo las diferentes condiciones experimentales, se encontraron los siguientes hallazgos:

- Los valores de L/S mínimos son menores a 0,3 en los cerámicos, muy cercanos a 0,3 en los precursores de vidrio y escorias, y mayores a 0,5 en los catalizadores. Bajo las condiciones estudiadas (curado térmico de 48 horas a 60°C, 28 días de curado en ambiente "seco"), los subproductos CA y EB no pudieron ser activados. Es posible que la falta de reactividad de las pastas de CA se explique por el bajo contenido de silicio en las proporciones de mezcla. Según investigaciones previas, la escoria de acero presenta propiedades hidráulicas, por lo tanto, el curado térmico inicial podría haber afectado el fraguado correcto del material.
- Las proporciones óptimas de mortero fueron una relación de arena precursor (A:P) de 1:1 y una relación L/S de 0,3. Las muestras de vidrio de contenedor mostraron el mejor comportamiento, mientras que los morteros de Testillo cocido y ladrillo rojo (RDC-TC) presentaron valores muy cercanos. En contraste, la muestra de lodo de vidrio (VL-mix) tuvo un valor considerablemente inferior y experimentó retracción.
- Las condiciones de curado térmico superiores a 48 horas favorecen el desarrollo de resistencia en los precursores cerámicos, mientras que perjudican a los precursores tipo vidrio.
- Bajo las condiciones mencionadas, los precursores de vidrio en matriz de hormigón superan los 25 MPa a los 48 días, mientras que los precursores cerámicos desarrollan su resistencia entre los 28 y los 48 días.
- El precursor de vidrio presentó el mejor desempeño mecánico, donde se observaron transformaciones del Si-O-Si hacia unidades Si-O-Na y sustitución de Mg²⁺. Estas sustituciones de los modificadores de red ayudan a que el Si sea reemplazado por cationes Ca²⁺ y Al³⁺.
- Es posible que algunos de los Ca²⁺ químicamente ligados al gel C-A-S-H se sustituyan por Na⁺, lo que resulta en la formación de un gel N-A-S-H. Los resultados revelan un contenido de productos de reacción del 28%. La formación de estas fases se da en periodos largos, superiores a los 28 días.

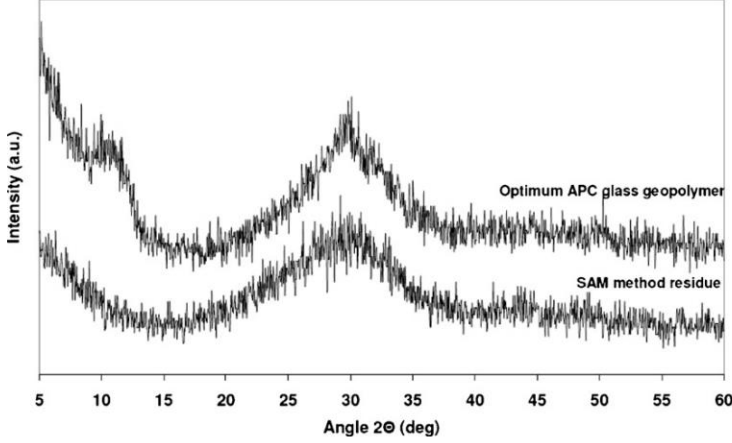
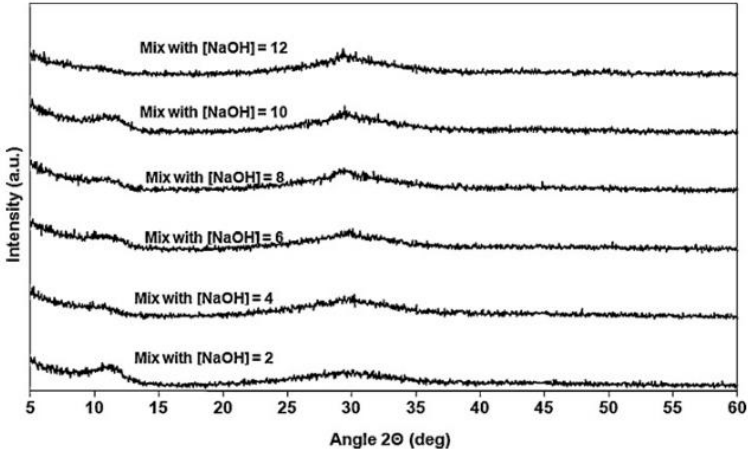
- En los últimos ajustes de la dosificación, se encontró que la finura es un parámetro que modifica de manera muy significativa la resistencia final del material.
- La aplicación de superplastificante es ineficiente para el MAA. El superplastificante a base de policarboxilatos solo logra un aumento del 7% en el flujo de V-C+P con una dosificación máxima entre el 1,5% y el 3,0% de aditivo, mientras que con un aditivo a base de copolímeros catiónicos se puede mejorar el flujo hasta un 32% con una dosificación entre el 1,5% y el 3,0%. En una mezcla con cemento como material aglomerante, se requieren aproximadamente 0,024 g/kg de cemento para generar 1 mm de flujo, mientras que en una mezcla equivalente de MAA basado en vidrio se necesitan 2,4 g/kg de superplastificante a base de policarboxilatos para obtener 1 mm de flujo, y 0,53 g/kg de aditivo dispersante a base de copolímeros catiónicos para obtener 1 mm de flujo.

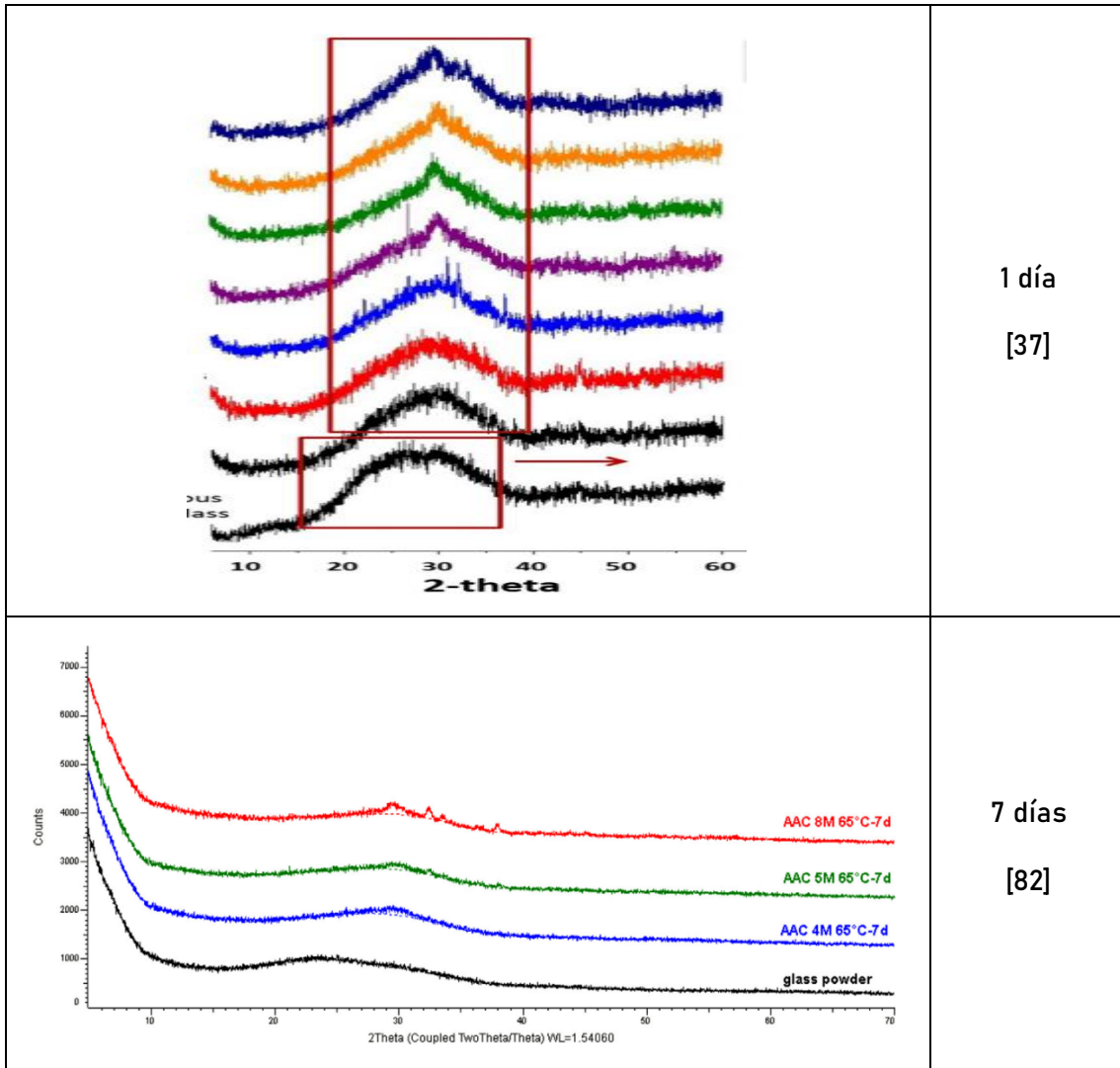
4.6 ANEJOS CAPÍTULO 4

4.6.1 Anejo 6. Interpretación espectros FT-IR

Vibraciones o picos (cm ⁻¹)			Significado	Referencia
Rango	centro			
498	498	498	Si-O-Si en tensión	[36]
460	480	470	Si-O-Si	[37]
574	574	574	Flexión en los enlaces O-Si-O	[36]
770	820	795	Estiramientos simétricos en enlaces Si-O-Si	[36]
775	800	788	Estiramientos simétricos en enlaces O-Si-O	[37]/[95]
850	850	850	Q ⁰	[83]
900	900	900	Q ¹	[83]
900	1200	1050	Estiramiento asimétrico de los enlaces Si-O	[36]
940	940	940	Oxígenos sin puente	[37]/ [95]
950	950	950	Q ²	[83]
950	1000	975	Silicatos de tipo Si-O-Na sin puentes de oxígeno - Q ² y Q ³ / C-A-S-H (cuando el contenido de Ca es alto) / Q ²	[36]/ [37]/ [83]
1050	1100	1075	Silicatos con enlaces Si-OH ₂	[36]
1100	1100	1100	Enlaces Si-O-Si silicatos con puentes de oxígeno/Q ³	[36]/[83]
1120	1120	1120	Vibraciones asimétricas del oxígeno puente en enlaces Si-O-Si	[37]/ [95]
1200	1200	1200	Q ⁴	[83]
1460	1460	1460	Grupos de tipo carbonato CaO, Ca(OH) ₂ , CaCO ₃	[36]/ [37]/ [95]
1634	1634	1634	H ₂ O	[95]
3760	2700	3230	H ₂ O	[95]

4.6.2 Anejo 7: Presencia halo 10-20 en espectro de DRX en pastas con precursores tipo vidrio

Espectro	Referencia
	<p>>28 días [81]</p>
	<p>90 días [80]</p>



4.6.3 Anejo 8. Datos reológicos complementarios.

Material	Precursor (g)	A/P	Arena (g)	Filler (g)	Activador (g)	Ad(EX) (% pp)	WG
<i>Descripción</i>	V-C+P	-	Arena Sílice SF 0.3/0.4	CaCO ₃ 97.5%	Solución NaOH 4M	-	EssentQ®
V-C+P-Ad(EX)-0%	4000	0.4	2,4	1,8	0,274	0	0,0425
V-C+P-Ad(EX)-3%	4000	0.4	2,4	1,8	0,274	3	0,0425

Las muestras sin aditivos no pudieron ser medidos con el viscosímetro porque no podía penetrar hasta el fondo de la mezcla.

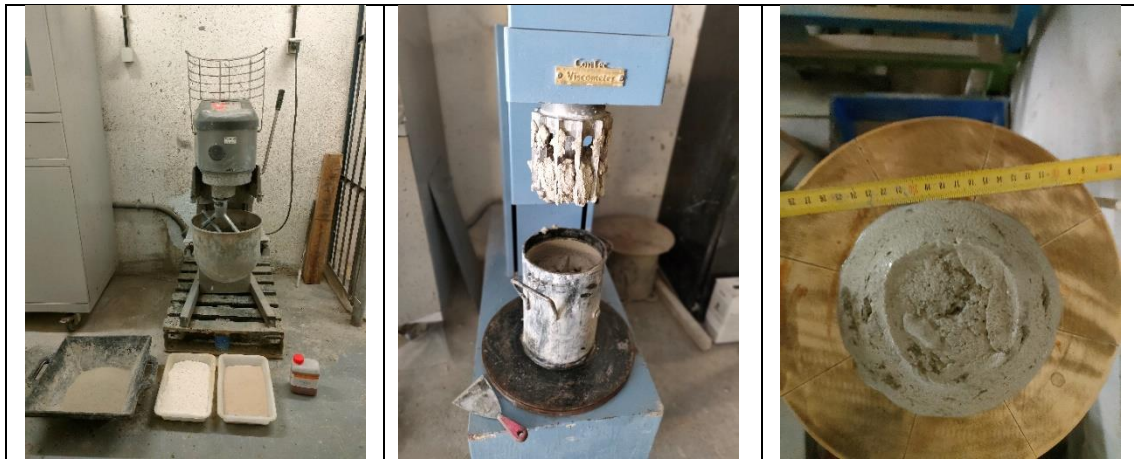
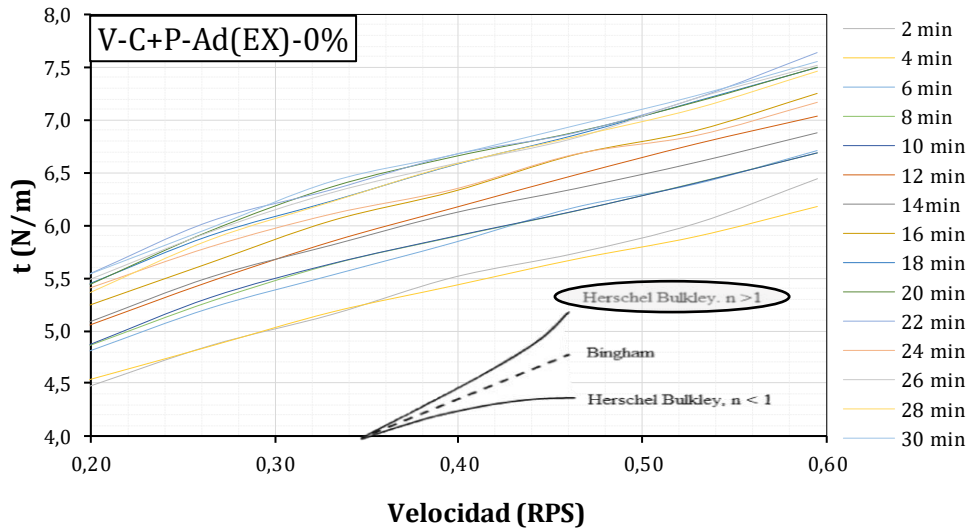


Figura 64. Comportamiento reológico, comparación de tipo de flujo.

a)



b)

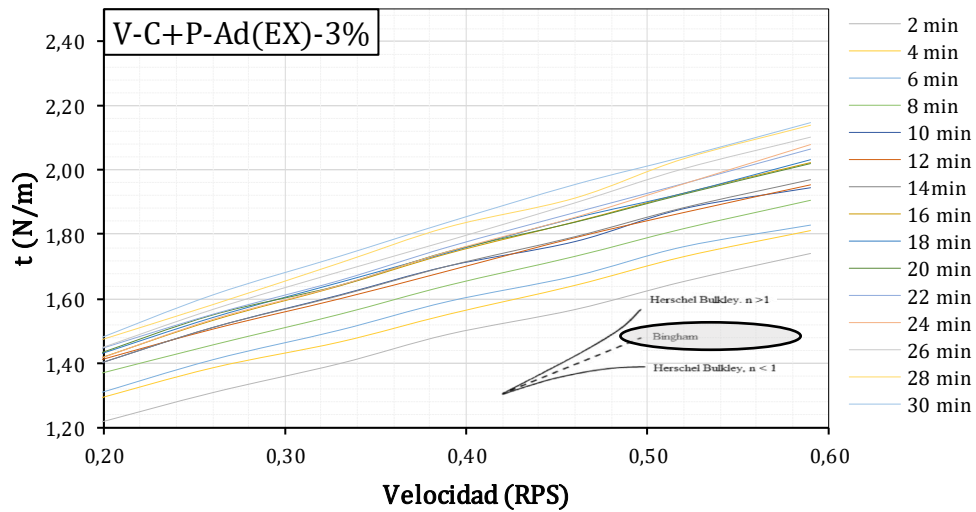
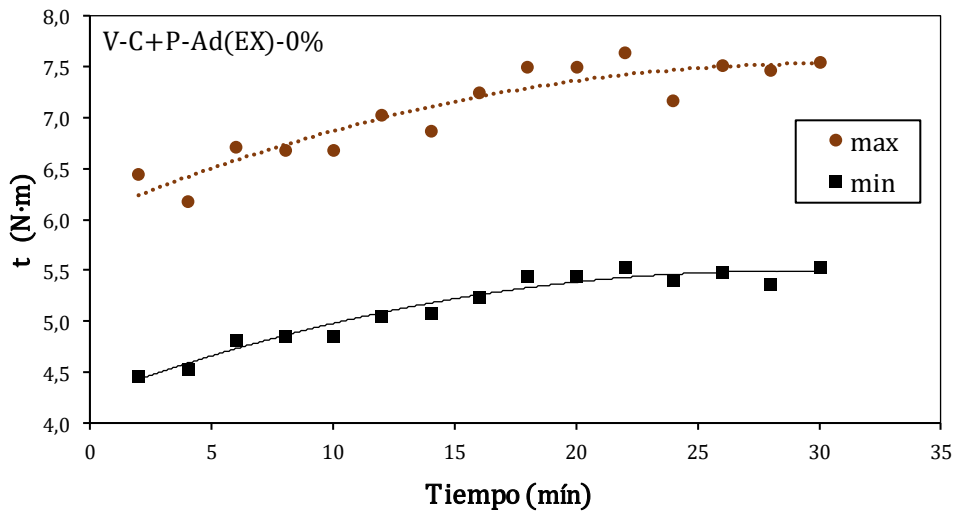
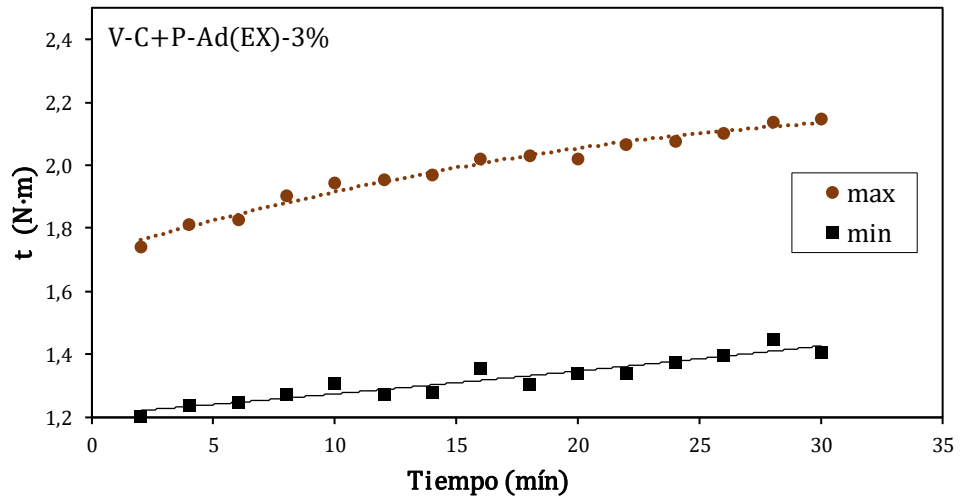


Figura 65. Comportamiento Medidas de reómetro, comparación de resistencia al corte t máxima y mínima en el tiempo.

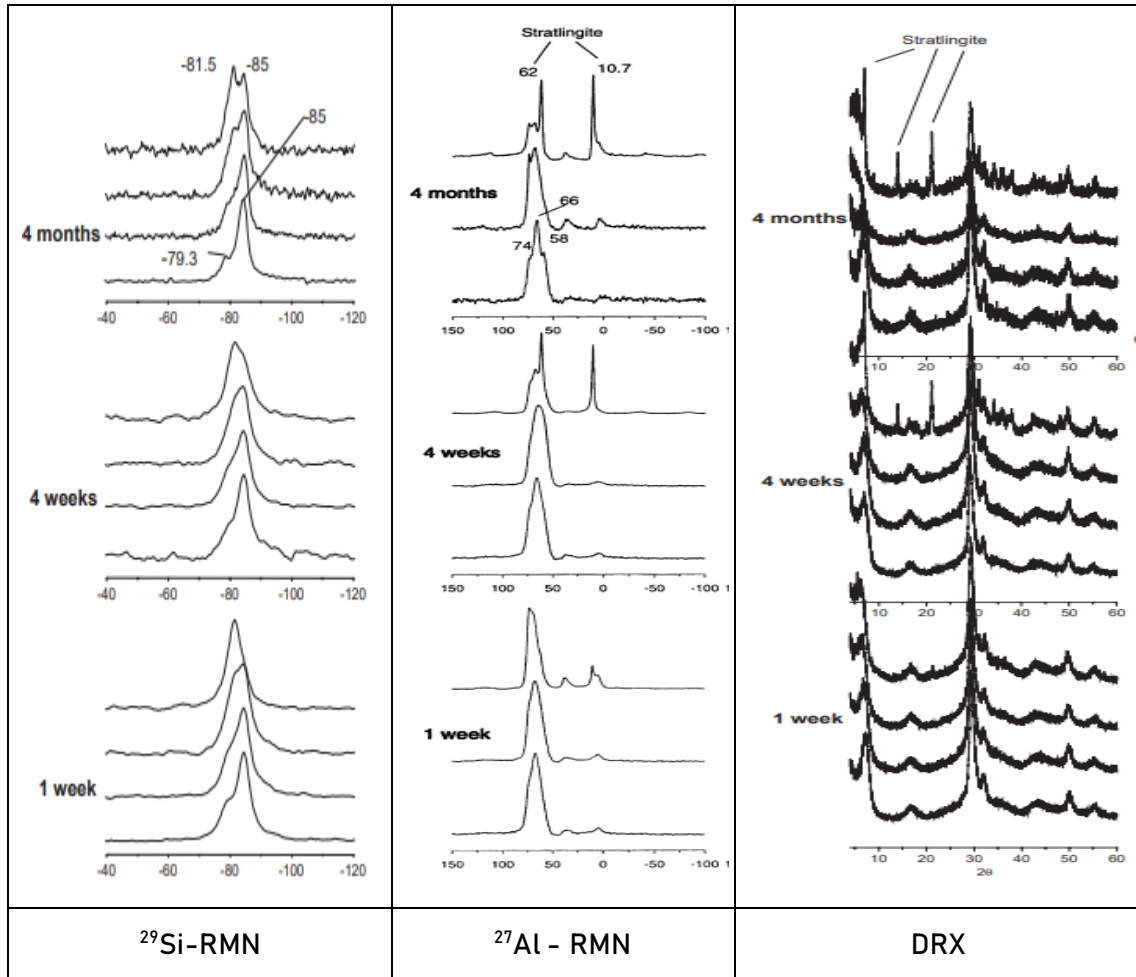
a)



b)



4.6.4 Anejo 9. Espectros de RMN y DRX para el C-S-H



Fuente:[96]

5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PREFABRICADO

5.1 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En el presente capítulo se presenta la revisión de los requisitos estructurales y del material para la ejecución de un prefabricado a partir del material activado alcalinamente (MAA), definido en el apartado 4, que serviría como elemento base para la constitución de un carril bici en suelo urbano.

Inicialmente, se realizó una revisión de la normativa vigente aplicable a la construcción de módulos prefabricados. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis mediante la simulación de elementos finitos del prototipo de prefabricado. Para dicha simulación, se empleó un análisis estructural 3D utilizando elementos tipo Shell-thick con la ayuda del software SAP2000. A través de esta primera modelación, se confirmó que el elemento crítico de la estructura era la losa superior.

En etapas posteriores, se procedió a la fabricación de la losa superior para verificar las posibles dificultades del proceso a una escala mayor y para realizar la caracterización final del material. Debido a la escala media del módulo, el punto crítico durante la fabricación fue la molienda del precursor, por lo que se llevaron a cabo experimentos para determinar la molienda óptima. Asimismo, se calcularon los momentos y las resistencias críticas de la losa prefabricada, verificando el cumplimiento de los parámetros esenciales.

Los resultados obtenidos revelan que, de acuerdo con la normativa vigente para la fabricación de un módulo prefabricado, se deben cumplir los siguientes límites tanto en relación al material como a la estructura: el precursor debe poseer una superficie específica mínima de $275 \text{ m}^2/\text{kg}$, y los esfuerzos mínimos resistentes deben cumplir con el criterio de deformación mínima $L/750$, además de asegurar una resistencia a la flexión que cubra un factor de seguridad mínimo de 1,35.

Es importante destacar que existen limitaciones en el uso del MAA, principalmente debido a que las normativas legales no permiten el empleo de un material distinto al cemento como cementante principal. Además, el elevado contenido de silicio ($>70\%$) del MAA impide cumplir con las ratios de verificación requeridas para su uso como adición.

Por otro lado, la superficie específica lograda con la metodología empleada resultó ser un 80% inferior a la exigida por la normativa.

No obstante, a pesar de las limitaciones mencionadas, los resultados obtenidos de la evaluación experimental y el análisis estructural indican que se logró obtener un MAA con una resistencia a la compresión de 41 MPa y a la flexión de 6,4 MPa, cumpliendo así con el factor de seguridad mínimo y las sollicitaciones estructurales establecidas. Las piezas fabricadas podrían ser empleadas en 14 de los 18 ambientes de exposición contemplados en el código estructural. Con un adecuado escalado industrial, enfocado en un proceso de molienda y curado optimizado, se podría alcanzar un mejor desempeño estructural.

Como última alternativa de MAA, se presenta la mezcla de un 30% de fracción no reciclable de vidrio con un 70% Testillo. Esta alternativa permite equilibrar la falta de silicio del Testillo y la falta de aluminio del Vidrio. La formulación anterior resulta en un material con una resistencia a compresión superior a 40 MPa.

5.2 METODOLOGÍA DEL CAPÍTULO

En esta fase se estudiaron los requisitos del MAA para su aplicación en prefabricados teniendo en cuenta las normativas existentes y se analizó la capacidad estructural de un módulo prefabricado. El esquema de la metodología de la presente fase se encuentra en la Figura 66.

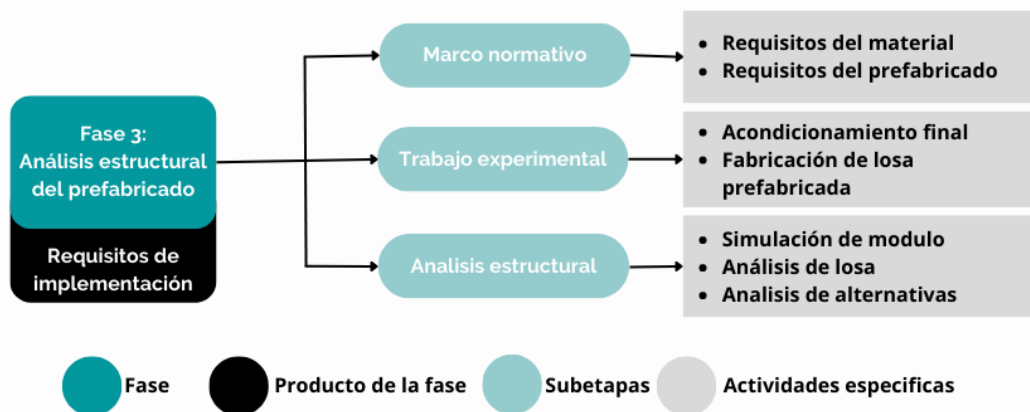


Figura 66. Metodología del capítulo 5.

Dentro de cada apartado se describen las normativas o procedimientos individuales de cada test experimental o para cada análisis. En los Anejos se puede encontrar una mayor profundización de los cálculos.

5.3 REQUISITOS SEGÚN NORMATIVA

Hasta hace poco tiempo, en España los códigos existentes habían definido pocos lineamientos para los elementos prefabricados de hormigón, quedando dispersos entre diferentes documentos, hecho que ha limitado la prescripción de estas soluciones frente a las convencionales de hormigón in situ. Antes del nuevo Código Estructural y la Instrucción EHE-08 hasta la versión de 2008, los elementos prefabricados de hormigón no habían tenido un tratamiento particular.

La normativa UNE 1124070:2021 es la primera normativa para prefabricados en España. Esta norma identifica aquellas características o prestaciones, determinadas por la reglamentación vigente, que son exigibles a los elementos prefabricados de hormigón. Fue publicada en el 2021 con referencias a la normativa EHE-08 pero luego fue modificada en 2022 con el reemplazo de las consideraciones del código estructural del 2021[97].

Por otro lado, la norma UNE EN 13369 establece los requisitos generales aplicables a una amplia variedad de productos prefabricados de hormigón. Esta norma, presenta criterios para abordar las variaciones en las normas específicas de producto en casos específicos. En el documento se encuentran las comprobaciones para asegurar el cumplimiento de sus propiedades para las diferentes aplicaciones[98].

En el código estructural vigente, se encuentran lineamientos relacionados con los prefabricados en los apartados siguientes:

- Artículo 54: Aspectos generales sobre la puesta en obra tipologías y uniones (también en Artículo 70).
- Artículo 57.9: Control del hormigón.
- Artículo 62: Control de calidad en cuanto a geometría y requisitos para certificación.
- Artículo 42: Juntas.
- Apartado 5.4 del Anejo 14: Tolerancias para los elementos prefabricados que no dispongan de marcado CE.

En la tabla 62.5.3.4 se establece que debe haber un control de 1 pieza por lote para “Elementos de grandes dimensiones tipo artesas, cajones...” y 3 piezas por lote para “Elementos tipo losas, paneles, pilares, jácenas...”. y que las uniones deben ser verificadas en cada elemento.

En lo que respecta a los factores de seguridad, se establece en el Anejo 14 que, en el caso de los elementos prefabricados, es posible reducir el coeficiente parcial de seguridad del hormigón. Esta reducción puede llevarse a cabo siguiendo las directrices estipuladas en el Anejo 19 del mismo, siempre y cuando el cálculo de la capacidad resistente de la sección se base en valores reales medidos en la estructura finalizada o en una sección resistente reducida. Dicha sección debe tener dimensiones geométricas obtenidas a partir de los valores nominales ajustados por las desviaciones contempladas en el apartado 6.1 del mencionado Anejo.

En la Tabla 38 se recogen otras las normativas que presentan los aspectos más importantes para los prefabricados.

Tabla 38. Normativa vigente relacionada con prefabricados.

Normativa	Información documental
<i>Código estructural 2021</i> [97]	Normativa estructural general
<i>UNE 1124070:2021</i> [99]	Normativa específica prefabricados (todos los tipos)
<i>UNE EN 13369</i> [98]	Aclaraciones técnicas para conseguir marcado CE de prefabricados
<i>EN 13670</i> [100]	Puesta en obra
<i>UNE 16757</i> [101]	Sostenibilidad

El MAA obtenido deberá cumplir con unos requisitos como cementante y como conglomerado y el prefabricado debe cumplir con un desempeño mínimo estructural. A continuación, se presentan los lineamientos más importantes recogidos de las anteriores normativas que serían relevantes para la implementación real de un módulo prefabricado de MAA.

5.3.1 Requerimientos del material

El código estructural no contempla el uso de subproductos activados alcalinamente como cementante, solo hace referencia a que el reemplazo máximo del cemento es del 35% de cenizas volantes. En Tabla A6.2 recomienda usar en prefabricados pretensados y armados cementos comunes de los tipos CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M (V-P) y el cemento común tipo CEM IV/A cuando se deduzca de un estudio experimental específico.

Las propiedades químicas y físicas de un cemento generado a partir la mezcla de residuos y/o subproductos que se quiera implementar en reemplazo del cemento, deberán cumplir con las normas EN 197-1[102] (cemento) y EN 15167-1 [103] (escorias), según las cuales:

1. La suma de las masas de CaO , MgO y SiO_2 debe alcanzar al menos dos tercios de la masa total, siendo el resto Al_2O_3 y otros compuestos.
2. La relación $(\text{CaO}+\text{MgO}) / \text{SiO}_2$ debe ser superior a 1.
3. La parte vítrea debe suponer al menos dos tercios en masa de escoria cristalina.
4. Los valores de finura o superficie específica no deben ser inferiores a $275 \text{ m}^2 / \text{kg}$.

La resistencia de proyecto no será inferior a 25 MPa tanto en hormigones armados como en pretensados.

Revisando los cuatro puntos anteriores con la composición química del precursor V-C+P mostrada en el capítulo 3 se encuentra que el mismo no cumple con el punto 2 debido a que se compone en más de un 70% de silicio. En cuanto a lo mencionado en el punto 4 sobre la superficie específica, en el apartado 5.4.1 de este capítulo se realizan diferentes pruebas para llegar a un valor mínimo de superficie específica del precursor.

5.3.2 Requerimientos de la estructura

Como se verá más adelante en el apartado 5.5.1.4, el elemento crítico del módulo es la losa, la cual se encuentra sometida a flexión. Según el código estructural, con carácter general, para los elementos prefabricados sometidos a flexión la flecha respecto al plano vertical debe ser menor a $L/750$. Para piezas mayores a 6 m existen otros criterios sobre la flecha máxima permitida [97].

El hormigón debe tener un coeficiente de seguridad de 1,5 pero, en el caso de los prefabricados pueden tener un coeficiente de seguridad de 1,35 siempre y cuando estén certificados con un distintivo de calidad oficialmente reconocido y un control de la ejecución. La desviación del recubrimiento no excederá los valores: $\pm 5 \text{ mm}$ en elementos prefabricados.

En el análisis de esfuerzos y al verificar los estados límite deben considerarse:

- La evolución de la geometría, las condiciones de apoyo de cada pieza y las propiedades de los materiales en cada etapa y la interacción de cada pieza con otros elementos;
- La influencia en el sistema estructural del comportamiento entre conexiones de los elementos, y en especial su resistencia y deformación;
- Las desviaciones de las dimensiones de los elementos causan incertidumbre en las condiciones de transmisión de esfuerzos entre las piezas. Por lo anterior es necesario evaluar la conexión y apoyo de elementos prefabricados, en cuanto a los materiales, el diseño de conexiones, anclaje de las armaduras en los apoyos, u otras consideraciones para el apoyo de piezas prefabricadas.

5.3.3 Sumario

En cada prefabricado se deben cumplir requisitos del material, de la estructura y otros que tienen que ver con su colocación en obra.

En prefabricados, el factor de seguridad mínimo que debe aplicarse al material es de 1,35. La superficie específica debe ser mayor a 275 m²/kg. En cuanto a la composición química, las normativas legales no permiten el uso de un MAA como cementante principal.

Si se empleara como adición las proporciones de los componentes del precursor implementado (V-C+P) cumplen con la suma total del contenido de silicio magnesio y calcio, pero no cumple con la relación $(CaO+MgO)/SiO_2$ la cual debe ser superior a 1. Lo anterior es debido a que un 70% del material está formado por silicio.

En cuanto al análisis estructural las normativas establecen que, el prefabricado, además de soportar los esfuerzos mínimos resistentes, debe cumplir con el criterio de deformación mínima inferior a $L/750$.

Teniendo en cuenta lo anterior, en los siguientes apartados se definen las características del material final y se verifican los esfuerzos de la estructura.

5.4 TRABAJO EXPERIMENTAL

5.4.1 Adecuación de la superficie específica del precursor

Tal como se evidenció en la segunda fase, la resistencia final del MAA tiene correlación directa con su grado de finura. En la revisión de la normativa correspondiente, se

establece un valor mínimo de superficie específica de 275 m²/kg (o equivalente a 2750 cm²/g) para el material cementante. Uno de los principales obstáculos que surgieron en el transcurso de la investigación radicaba en la trituración del material a la escala requerida para la fabricación de piezas de tamaño industrial.

Los volúmenes requeridos para la construcción de prototipos rondaban los 500 kg, mientras que los equipos de trituración industriales exigen mínimos que ascienden a decenas de toneladas. En consecuencia, resultó sumamente complicado encontrar un equipo y método adecuado para refinar el material en esta escala. Como punto de partida, se tomaron en cuenta pruebas previas para determinar una metodología de molienda.

En el Anejo 10 1 se ofrece un repaso de los métodos de molienda utilizados a mediana escala en investigaciones anteriores. A partir de los parámetros extraídos de estas investigaciones, se delineó el procedimiento experimental.

5.4.1.1 Procedimiento

Se trituraron seis grupos de muestras, cada uno diferenciado por su método de molienda y su granulometría final. Las muestras fueron trituradas en la Máquina de los Ángeles, variando tanto el contenido y tipo de bolas (46.8 mm y 9.5 mm) como el número de vueltas.

Tabla 39. Muestras iniciales para la determinación del método óptimo de molienda.

Muestra	Peso de muestra (g)	Bolas 46.8 mm (g)	Bolas 9.5 mm (g)	Vueltas (Nº)	Tiempo (minutos)
1	5000	5000	0	1000	31,7
2	10000	3000	2000	1000	31,7
3	5000	3000	2000	1000	31,7
4	5000	5000	0	2000	63,5
5	5000	0	5000	1000	31,7
6	5000	0	5000	2000	63,5

5.4.1.2 Resultados

En la Figura 67 se puede observar el cambio en la granulometría con respecto a la muestra original, mostrando que las distribuciones granulométricas de las muestras trituradas abarcan un rango de partículas entre 0.01 y 3 mm.

En la Tabla 40 se observa que la muestra 1 posee un diámetro medio (D50) de 997 µm, y al incorporar bolas de menor diámetro (muestra 3), el D50 se reduce a 730 µm,

umentando la superficie específica de 149.7 a 273.3 cm^2/g . Al introducir bolas pequeñas, se produce una reducción del tamaño medio o D50 en un 27%.

En la muestra 2 al duplicar el volumen de material de 5 kg a 10 kg con respecto a la muestra 3, se observa que este cambio disminuye la superficie específica de 273.30 a 130.70 cm^2/g (-52.17 %) y aumenta el tamaño medio de partícula de 730 a 1100 μm . Al incrementar el volumen de llenado del material de 30% a 60%, se reduce en más de un 50% la superficie específica obtenida, pero al incorporar bolas pequeñas se obtienen curvas granulométricas similares a las observadas cuando solo se tiene un 30% de volumen de llenado.

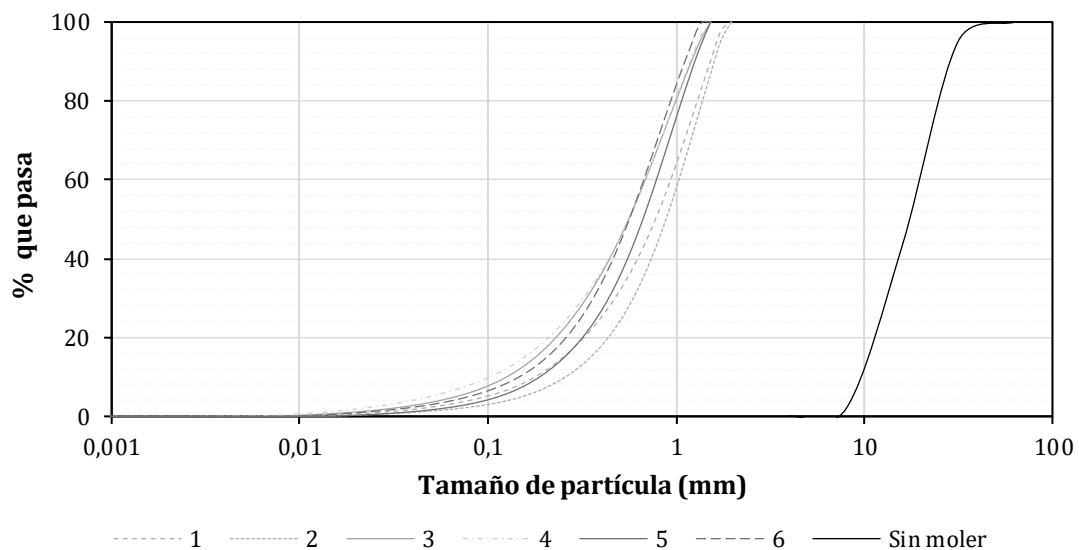


Figura 67. Granulometría de muestras de material V-C+P con diferentes métodos de molienda. Al aumentar el número de vueltas de 1000 a 2000 (de muestra 1 a muestra 4), la densidad de partículas finas aumenta, pasando de una superficie específica de 149.7 a 262.00 cm^2/g , un valor que es muy cercano cuando se reemplazan bolas grandes por pequeñas (muestra 3). Esto indica que el impacto en la distribución granulométrica al aumentar el número de vueltas de 1000 a 2000 es comparable a reemplazar una fracción de bolas grandes por bolas pequeñas.

Finalmente, al emplear únicamente bolas pequeñas (muestras 5 y 6), la superficie específica supera los 300 cm^2/g , pero no mejora al aumentar el número de vueltas.

Tabla 40. Cambios en la granulometría con la aplicación de diferentes tipos de molienda.

Muestra	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Pasa apertura 0,5 mm (%)	Superficie especifica (cm^2/g)
1	221	997	2250	45,63	149,70
2	316	1100	2310	41,55	130,70
3	157	730	1940	48,28	273,30
4	132	733	1890	54,24	262,00
5	229	836	1940	49,04	331,20
6	182	716	1770	62,95	312,50

Esto significa que una vez que se alcanzan las condiciones de eficiencia óptima, que consisten en un medio triturador de bolas pequeñas y un volumen de llenado del 30%, no es eficiente continuar la molienda más allá de los 1000 ciclos.

Se esperaba que la combinación de bolas grandes y pequeñas diera el mejor resultado; sin embargo, se encontraron mejores resultados al incorporar bolas pequeñas. Jumia y Funio (1998) mostraron que la reducción del tamaño de partícula aumenta con una disminución en el diámetro de bola cuando la rotación del molino es mayor a 500 rpm, mientras que es independiente del diámetro de bola para velocidades menores a 300 rpm [104]. La máquina de los Ángeles gira entre 30 y 35 rpm, por lo tanto, una reducción del tamaño de las esferas en su totalidad es beneficiosa, pero una combinación de los dos tipos no aumenta la eficiencia del sistema.

Para mejorar la finura del material, es necesario removerlo para separar la fracción fina deseada e incluir el material sobrante dentro del sistema para alcanzar la granulometría mínima.

5.4.1.3 Ajuste del método

En la el apartado 4 en el análisis de efecto de la finura, se establece que el tamaño mínimo de partícula debe ser 0,3 mm para lograr una resistencia mayor a 20 MPa. Sin embargo, con la metodología que proporcionó los mejores resultados (muestra 5), se obtuvieron partículas con un tamaño medio de 0,8 mm. Por lo tanto, se prepararon 3 muestras de mortero utilizando la misma metodología del apartado 4 para reducir el tamaño de partícula medio y evaluar la densidad y la absorción. Estas muestras se denominan muestra 7, 8 y 9 (ver Figura 68).



Figura 68. Muestras de precursor V-C+P con diferente finura.

La muestra 7 se obtuvo al repetir el proceso de la muestra 5 hasta obtener un material con un tamaño de partícula menor a 0,5 mm. Las muestras 8 y 9 fueron molturadas con un molino de anillos y tamizadas para lograr una granulometría con tamaños de partícula inferiores a 0,16 mm y 0,064 mm, respectivamente.

Tabla 41. Cambios en el tamaño de partícula la densidad y la absorción en morteros de V-C+P.

Muestra	Cribado por el tamiz (mm)	Proceso de obtención	D50 (μm)	Densidad (kg/m^3)	Absorción (%)
7	0,5	Proceso muestra 5 repetido hasta un $D < 0.5$ mm en toda la muestra	319	2089,78	1,11
8	0,160	Molino de anillos	90	2167,18	1,00
9	0,064	Molino de anillos	42	2273,61	0,51

En la Tabla 41 se puede observar que la muestra 7 da como resultado el valor de D50 fue de 0,32 mm. La densidad supera los $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ y la absorción se encuentra por debajo del 2%. Estos valores no difieren significativamente de los obtenidos en las muestras 8 y 9, que presentan superficies específicas inferiores.

A partir de los resultados obtenidos, se establece que, para lograr el material V-C+P más fino utilizando la máquina de los Ángeles, se debe incorporar un volumen de material equivalente al 30% (5 kg) junto con 5 kg de bolas de 9.5 mm, con un total de 1000 vueltas. De esta manera, se puede obtener un tamaño D50 de 0,3 mm y una superficie específica mínima de $581,2 \text{ cm}^2/\text{g}$.

5.4.2 Fabricación de losa

La superficie específica mínima obtenida no cumple con lo estipulado en el código estructural mencionado en el apartado 5.3.1. Teniendo en cuenta lo anterior, para la fabricación de especímenes de hormigón se tomó la dosificación final entregada en el apartado 4 y se sustituyó un 10% del precursor en peso por cemento. Con esta

sustitución se espera mitigar la posible reducción de resistencia por la falta de finura e incluir un mayor contenido de calcio y aluminio al cementante.

5.4.2.1 Procedimiento

Se realizó una mezcla de un MAA con precursor V-C+P para preparación de dos losas prefabricadas y caracterización mecánica con las siguientes proporciones de mezcla y materiales.

Tabla 42. Proporciones mezcla para MAA de V-C+P.

Material	cemento (kg)	Precursor (kg)	NaOH (kg)	Solución (L)	WG (L)	Árido fino (kg)	Árido grueso (kg)	Fibra (g)
<i>Descripción</i>	CEM I 42,5 R	V-C+P molienda 7 SE 58 m ² /kg	PanReac®, 98% pureza	NaOH 5M	Silicato de sodio EssentQ® (70,2 % SiO ₂ y 2,5 % Na ₂ O)	Arena Sílice SF 0.3/0.4	Calizo 4 mm	PVA BASF 0,7%
<i>Cantidad</i>	7,22	72,43	6,04	29,57	0,60	57,94	10,86	362,13

Se realizó el mezclado siguiendo las siguientes etapas:

- Mezclado en seco: V-C+P + el activador- 4 min
- Despegar con barra de acero- 1 min
- V-C+P + el activador-4 min
- Adición del cemento- 3 min
- Despegar con barra de acero-1 min
- Adición de la fibra mientras se mezcla el agregado tratando de que se incorpore suelta.

Se fabricaron 2 losas de 40x80x5 cm como demostrador y diferentes tipos de muestras para realizar evaluaciones mecánicas los cuales fueron: 4 cilindros de 20h*10 Ø cm para determinación de módulo y 6 vigas de 75x75x275 cm de las cuales 3 fueron tomadas para determinar la resistencia a la flexión y las otras 3 se cortaron hasta obtener 6 cubos de 75x75x75 cm para ensayos de compresión y densidad. Las muestras fueron cubiertas y curadas a 70°C x 48 horas de acuerdo a lo establecido en el apartado 4.



Figura 69. Etapas de preparación MAA V-C+P.

El ensayo de resistencia a compresión y flexión se llevó acabo a los 48 días siguiendo la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 en una Maquina universal ME-402/20, con una velocidad de carga de 2,4 kN/s.

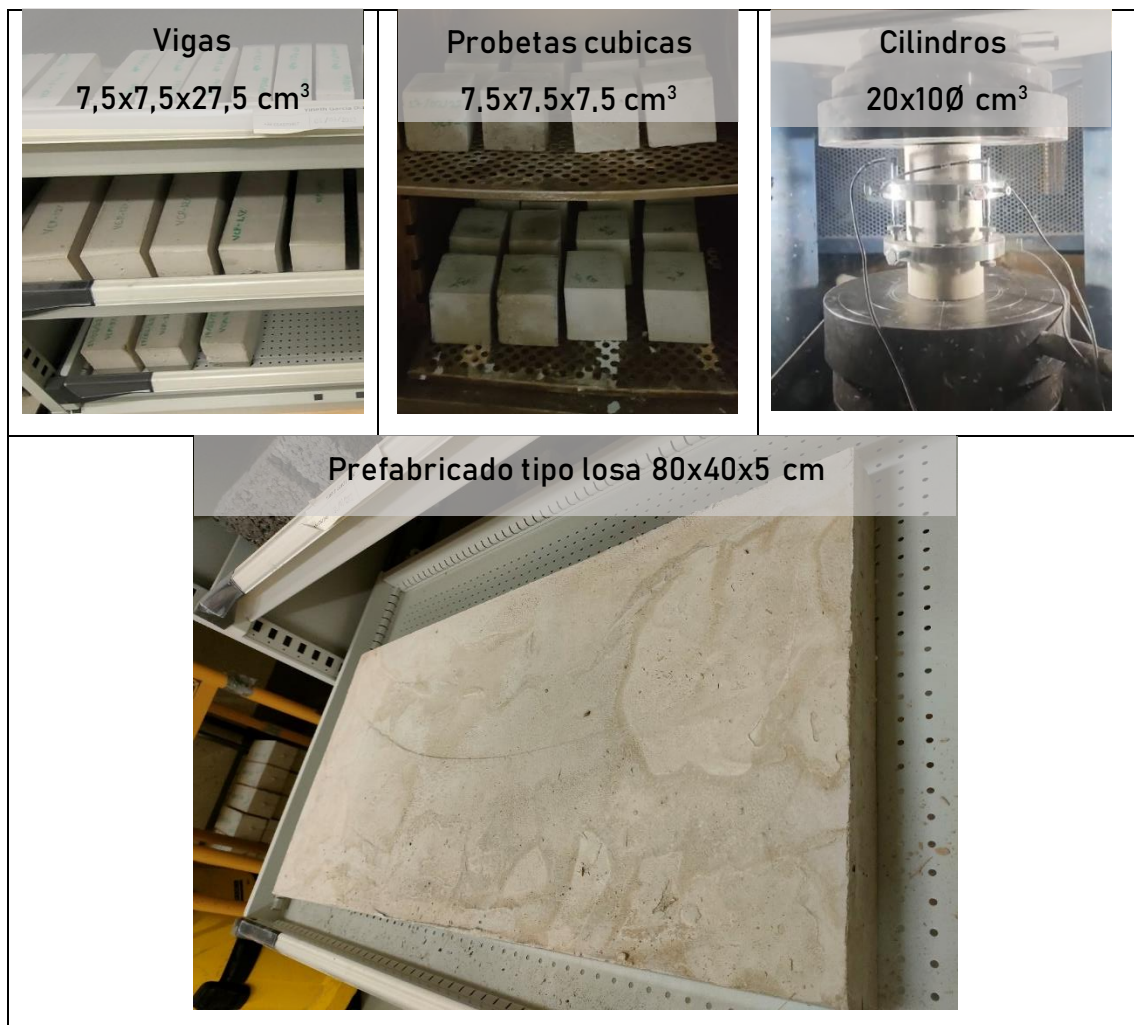


Figura 70. Muestras de MAA V-C+P.

Los resultados de la Tabla 1 servirán como base de los análisis de la estructura y del cumplimiento de las normativas relacionadas.

5.4.2.2 Resultados de caracterización

Tabla 43. Resultados de caracterización del MAA de V-C+P.

Parámetro	Norma/método	Valor	DSV(±)	Unidad
Consistencia	UNE 83313:1990	9	-	cm
Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3:2020	41.7	3.12	MPa
Resistencia a la flexión	UNE-EN 12390-5:2020	6.4	0.63	MPa
Módulo de elasticidad	UNE-EN 12390-13:2022	32.4	3.12	GPa
Densidad	UNE-EN 1936:2007.	2.092,4	35.2	Kg/m ³
Absorción		1.24	0.23	%

La resistencia máxima obtenida 41.7 MPa dividida dentro del factor de seguridad da un valor de 30.1 MPa. Según la Tabla F.1 del Anejo informativo del código estructural, la cual muestra los valores límite recomendados para la composición y propiedades del hormigón, las piezas fabricadas se pueden emplear en 14 de los 18 ambientes de exposición. Los valores de resistencia no cumplirían par ser empleados únicamente en los ambientes de exposición siguientes:

- XS 2: Permanentemente sumergido
- XS 3: Zonas en contacto con las mareas, zonas con salpicaduras de agua o de agua atomizada
- XD 3: Ciclos de mojado y secado
- XA3: Ambiente de agresividad química fuerte. Hormigón expuesto a suelos y aguas subterráneas naturales según la tabla 2 (UNE-EN 206)

5.4.3 Sumario

Luego de analizar 7 tipos de molienda a pequeña escala se logró establecer una metodología para optimizar la molienda del material. Para obtener material V-C+P con una superficie específica 58,1 m²/kg a pequeña escala se puede emplear la Máquina de los Ángeles añadiendo un 30% de volumen de material (5 kg) con 5 kg de bolas de 9.5 mm hasta 1000 vueltas. Sin embargo, este valor de superficie específica se encuentra por debajo de lo requerido por la normativa 275 m²/kg.

Pese a lo anterior, con el ajuste de la dosificación al adicionar un 10% de cemento como reemplazo del precursor y fibras se pudo lograr obtener un MAA de con propiedades mecánicas superiores a las de un hormigón tipo H25. Teniendo en cuenta los valores de resistencia a compresión, las piezas fabricadas se pueden emplear en 14 de los 18 ambientes de exposición.

Las piezas prefabricadas de MAA de 80x40x50 mm no presentaron ninguna variación de comportamiento con respecto a las muestras pequeñas realizadas en el apartado 4.

5.5 REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES

El proyecto marco en donde se desarrolla esta de tesis doctoral tiene como objetivo la construcción de un módulo prefabricado utilizando un material alternativo al hormigón, con el fin de reducir la huella de carbono en comparación con un módulo prefabricado de cemento Portland. Este módulo consiste en una estructura tipo cajón que alberga un espacio interior para posibles filtros, permitiendo al mismo tiempo la canalización de agua y disponiendo de una losa superior removible. Se proyecta que la losa superior sea permeable en ciertos tramos para la recolección de agua. Estos módulos se colocarán de manera continua para formar un carril transitable para bicicletas (carril bici). Este carril bici será para el tránsito de peatones, bicicletas y, eventualmente, camiones de servicio urbano de limpieza.

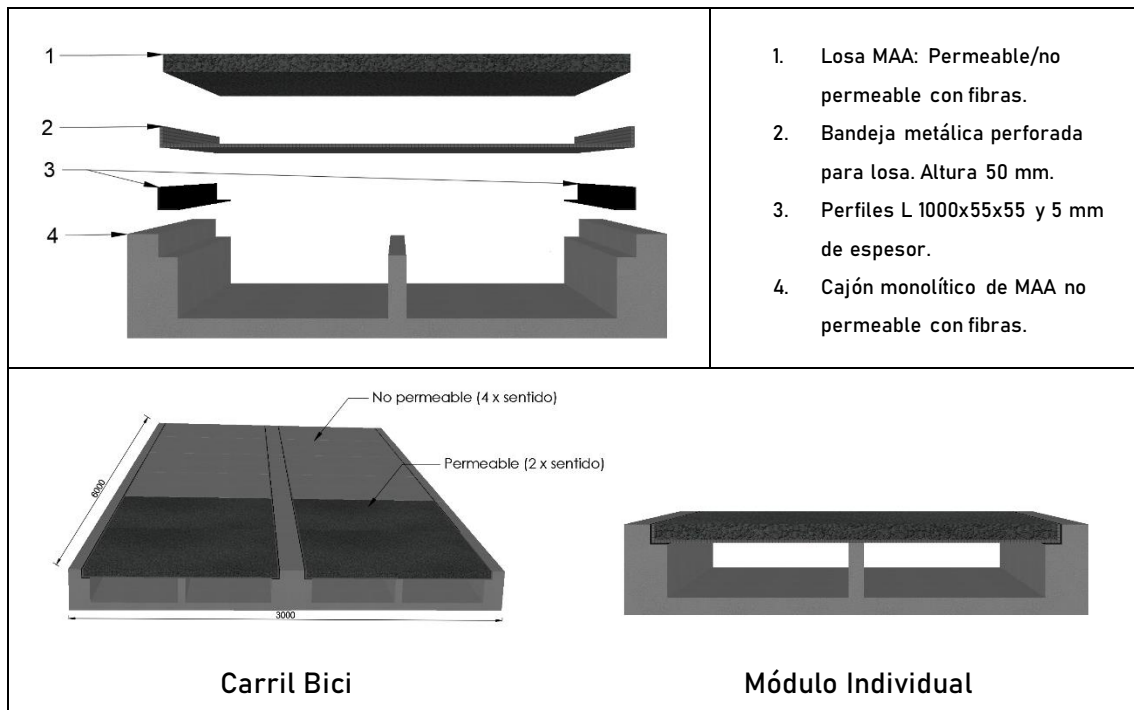


Figura 71. Esquema de modulo inicial de proyecto.

En el Anejo 14 se encuentra un plano con las dimensiones finales del módulo.

Las cargas consideradas son las siguientes: carga muerta debido al peso propio del módulo, carga de empuje lateral del suelo, carga viva generada por peatones en la losa superior, carga de una lámina de agua de 30 cm en la losa base (proveniente de agua

de lluvia recolectada) y la carga del vehículo de limpieza sobre la losa superior. Estas acciones se describen en la Figura 72.

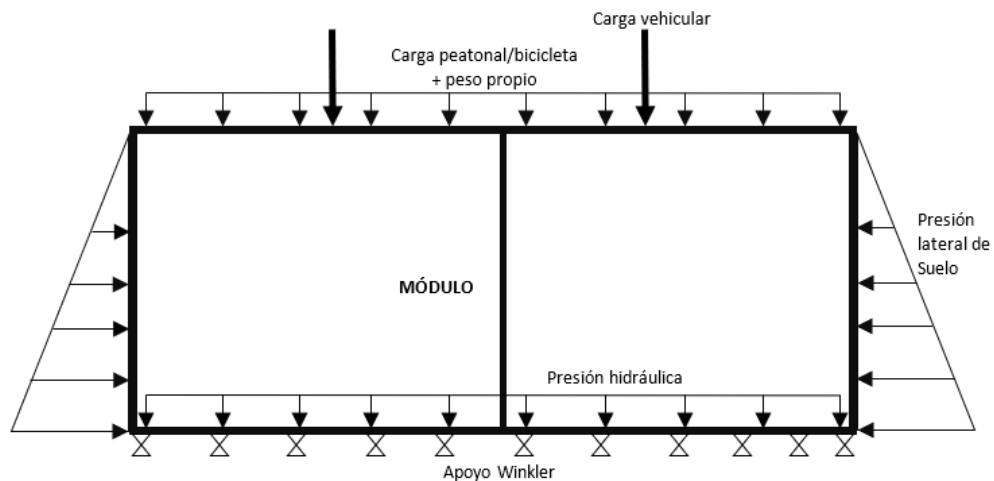


Figura 72. Cargas actuantes sobre el módulo.

- **Carga muerta:** se refiere al peso propio del módulo, con un valor de 0,6 toneladas. Se determina utilizando la densidad del MAA (determinada en el apartado 5.4.2.2.) y las dimensiones del módulo.
- **Presión lateral del suelo:** La carga lateral del suelo se simula como una carga triangular a cada lado del módulo, y se mantiene lo largo de toda su longitud. El valor máximo se encuentra en la base del módulo y disminuye hasta cero en la parte superior. Esta carga depende del tipo de suelo y la altura del módulo.
- **Presión hidráulica:** Se refiere al agua estancada en los compartimentos internos del módulo, proveniente de la escorrentía o lluvia.
- **Carga vehicular:** Se asume que es una carga dinámica y corresponde al camión de limpieza. Se verificará si esta carga es crítica para el elemento prefabricado, debido a su magnitud.
- **Carga peatonal:** Se considera una carga uniforme sobre toda el área de la losa superior, proveniente del paso de peatones y/o bicicletas.

5.5.1 Análisis del modulo

En el análisis estructural, se establece una relación entre las fuerzas y los desplazamientos de cada elemento de la estructura, para luego ensamblar el modelo discreto, aplicando las condiciones de equilibrio de fuerzas y la compatibilidad de desplazamientos entre los elementos. La solución obtenida mediante el modelo discreto es una aproximación de la solución real del problema.

Se realizó una simulación utilizando elementos finitos en el software SAP 2000 V20.2, en tres dimensiones. Se emplearon elementos sólidos de 8 nodos. Al generar la malla de elementos finitos, se procuró que las relaciones de aspecto estuvieran cercanas a la unidad, ya que no se recomiendan relaciones de aspecto inferiores a 4.

Las condiciones de la simulación fueron las siguientes:

- Se modeló utilizando elementos sólidos y se subdividieron en una malla con unidades de 0.1 m.
- La carga crítica se consideró como la carga del camión (2,5 toneladas por rueda), ubicado en el borde del módulo.
- No se consideró la presión lateral del suelo, ya que no tiene un impacto significativo debido a la altura del módulo (menor a 0,4 m).
- Todos los elementos están conectados.
- La interacción suelo-estructura se simuló mediante resortes en los nodos de la base.

A continuación, se describen con mayor detalle las características de la modelación.

5.5.1.1 Suelo

Tabla 44. Cálculo del coeficiente de balasto en la base del módulo.

Posición			Denominación de K	Cálculo	Valor final de K (kN/m)			
K_{esquinas}	K_{borde}	K_{esquinas}	K_{interno}	$210 \times 0.05 \times 1$	1050			
K_{borde}	K_{interno}	K_{borde}				K_{borde}	$210 \times 0.05 \times 0.5$	525
K_{esquinas}	K_{borde}	K_{esquinas}				K_{esquinas}	$210 \times 0.05 \times 0.25$	262.5
Base del modulo								

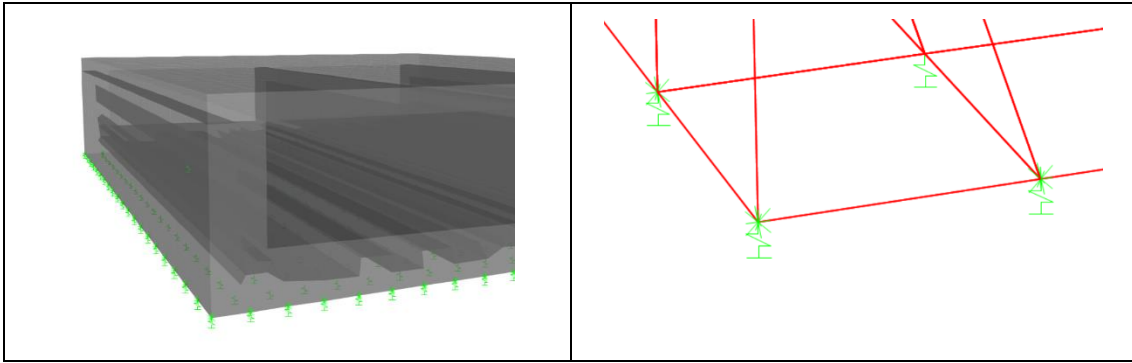


Figura 73. Resortes simulando de la rigidez del suelo.

Según el documento Básico SE-C Seguridad estructural Cimientos 2019, se seleccionó un coeficiente K de 210 MN/m³, correspondiente al punto medio de una grava arenosa compactada (ver Tabla 44).

Se utilizaron resortes en los nodos inferiores del módulo para simular la interacción suelo-estructura. Se consideró que el módulo de balasto era un 100% de su valor en los nodos internos de la base, el 50% en el perímetro y en las esquinas se consideró que tenía un valor del 25%. Esto se tuvo en cuenta en un areas de influencia de 0.05 m². Para determinar el valor final de K (KN/m), se siguieron los pasos indicados en la Tabla 44.

CityCat 5006

Dimensions	Noise level cab	Engine Euro 6d
Length	63 dB(A)	FPT, Iveco Euro 6d NEF4 Euro VI Step D
Width		Engine displacement 4485 cm ³
Height		Output 118 kW
Wheelbase		Torque 580 Nm
Track		AdBlue tank 30 l
Max. cleaning width 2 brushes		
Max. cleaning width 3 brushes		
Max. cleaning width 3 brushes (RCB)		
Turning radius		
	Driving performance	Engine Stage IIIA*
	Working speed 0-20 km/h	FPT, Iveco Stage IIIA NEF4 Stage III A
	Travelling speed 0-80 km/h*	Engine displacement 4485 cm ³
	Climbing ability 30 %	Output 104 kW
		Torque 608 Nm
	Chassis	Fuel tank 110 l
	Bucher fabricated ladder frame chassis with "C" rail construction.	Electrical system 24 V
	GWV 10500 kg / 10400 kg (80 km/h)	
	Empty weight 5500 kg / 5600 kg (80 km/h)	
	Payload 5000 kg / 4900 kg (80 km/h)	
Tyres		
265 / 70 R 19.5 140 / 138M		

* According to national legislation

Figura 74. Especificaciones camión de limpieza.

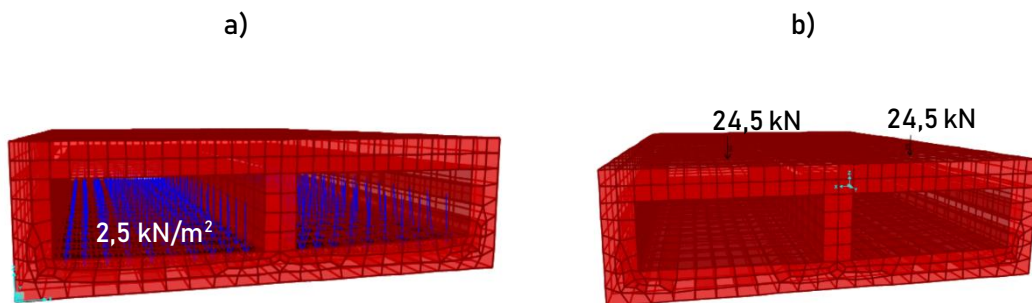
5.5.1.2 Magnitudes de cargas

Se considera como carga el peso propio del módulo. Debido a que la densidad de los filtros es desconocida, se considera una carga de $2,5 \text{ kN/m}^2$ para tener en cuenta el peso del filtro y del agua en los compartimentos internos. No se ha tenido en cuenta la presión lateral del suelo, ya que su influencia es mínima debido a que la profundidad máxima del módulo es de $0,4 \text{ m}$ y su cálculo requiere un mayor esfuerzo computacional.

La carga principal es la del camión de limpieza, con un peso máximo de $10,5$ toneladas. Al dividir esta carga, obtenemos una carga puntual de $24,5 \text{ kN}$ por rueda. En la Figura 74 se presentan las especificaciones del vehículo.

Dado que la distancia entre los ejes del camión es de $2,45 \text{ m}$, no es posible que ambos ejes del camión se encuentren en un solo módulo. En el modelo, se ubicaron dos cargas puntuales en la parte más cercana al borde de la losa superior del módulo, de manera que se evalúe la condición más crítica.

Figura 75. a) Cargas de agua y b) de un eje del camión de limpieza.



5.5.1.3 Materiales

Los módulos están compuestos por MAA con precursor V-C+P. En la Tabla 45 se encuentran las propiedades de los materiales utilizados en el modelo.

Tabla 45. Propiedades de los materiales del modelo.

Descripción	Densidad*	Módulo		Coeficiente de expansión térmica A (m/m x °C)	Coeficiente de Poisson
	(kg/m³)	(MPa)	(KN/m²)		
MAA de V-C+P	2090	30.1	32400	$9,9 \times 10^{-6}$	0.21

5.5.1.4 Resultados

La máxima deflexión se produce en el centro de la losa superior, en el borde, con una magnitud de 1 mm (U3 en la Figura 76). En la Tabla 46 se encuentran la deformación máxima, los esfuerzos de flexión y el esfuerzo cortante crítico del módulo.

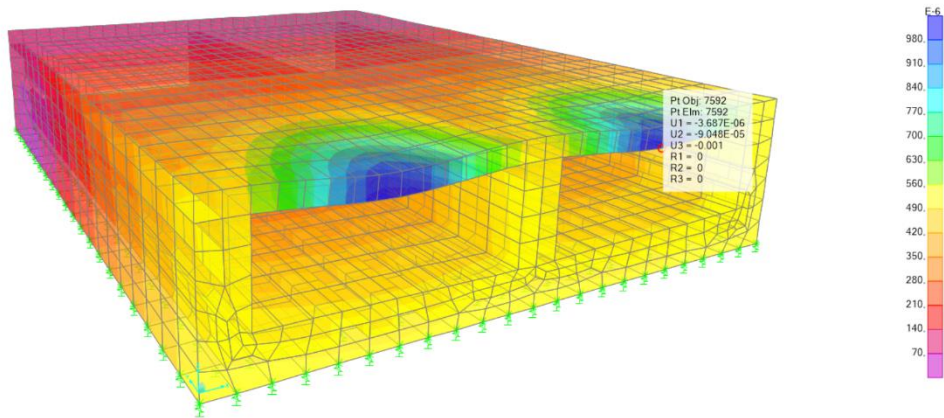


Figura 76. Deformación U3 en m.

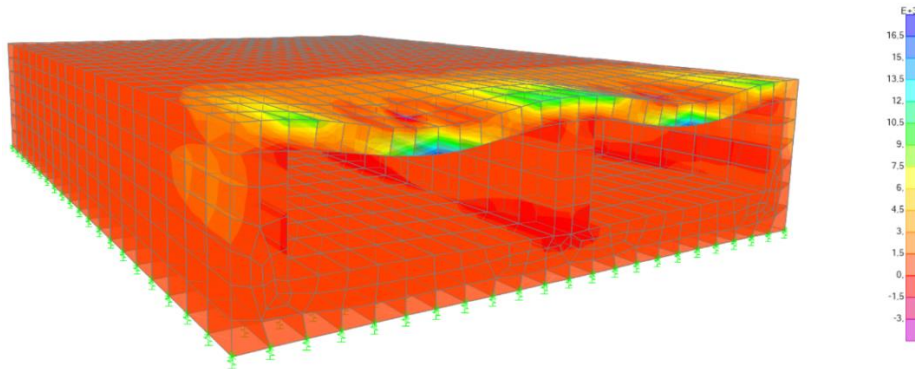


Figura 77. Esfuerzo Smax en KN/m².

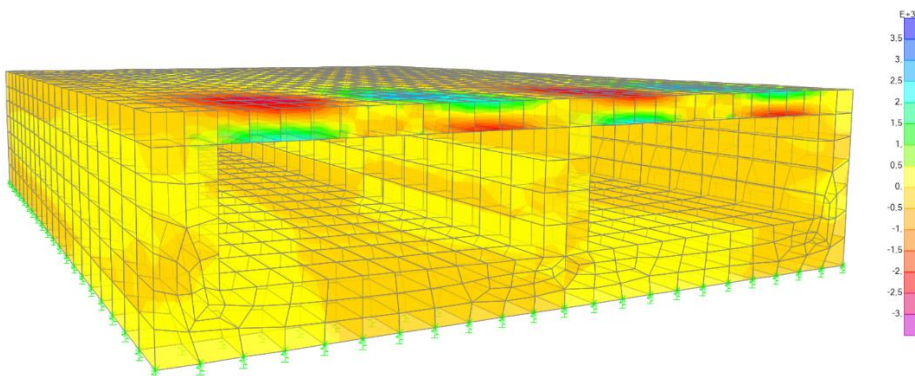


Figura 78. Esfuerzo Cortante S12 en KN/m².

Tabla 46. resumen de resultados de las 4 modelaciones.

Deformación U3 (m)	Esfuerzo máximo SMax (kN/m ²)	Esfuerzo cortante S12 (kN/m ²)
-0.001	-4169,11	3281,5

5.5.2 Análisis de la losa

Teniendo en cuenta que la losa es el elemento crítico, y tomando en consideración los datos de caracterización del apartado 5.4.2.2 se procedió a verificar los requisitos estructurales de la losa. Se realizaron comprobaciones para garantizar tanto la flexión máxima como el valor máximo de deflexión para el estado límite de servicio.

5.5.2.1 Procedimiento

Para el análisis de la losa, se simplificó como una viga continua y ancha apoyada en tres puntos. Para determinar los esfuerzos, se aplicó el teorema de los tres momentos, considerando las cargas actuantes del peso del camión, la carga viva (peatones y ciclistas) y el peso propio. En el Anejo 12 se encuentra la deducción de las ecuaciones utilizadas para el cálculo. En la Tabla 47 se presenta la simplificación del sistema y los resultados obtenidos para el momento máximo y el cortante.

Luego de determinar el momento máximo, para calcular el esfuerzo de flexión máximo, se despeja su valor de la ecuación de Navier para vigas sometidas a flexión pura. La deformación máxima se calcula utilizando la ecuación de la deformada por flexión del eje longitudinal de una viga recta, teniendo en cuenta el módulo de elasticidad determinados en el apartado 5.4.2.2 y la inercia.

Según el apartado 5.3.2, los valores mínimos admisibles para la losa como elemento prefabricado son los siguientes:

El factor de seguridad del material debe superar el valor de 1,35. En este caso, el parámetro crítico del material es la resistencia a la flexión.

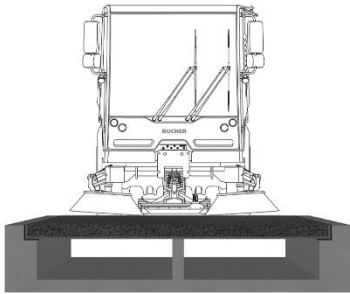


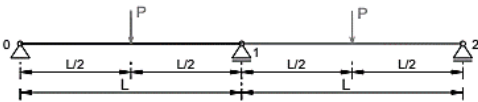
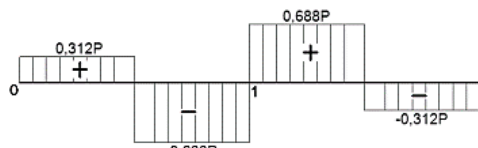
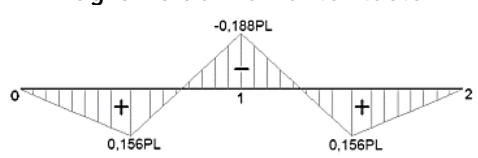
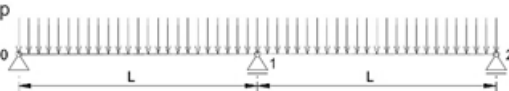
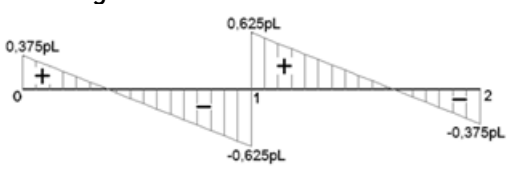

La deflexión máxima debe ser inferior a $L/750=0,87$ mm, donde L corresponde a la longitud del vano libre de la mitad del módulo (0,653).

5.5.2.2 Resultados

El momento máximo en la losa se produce debido a la acción del camión, y es negativo. Se genera en el tabique central del módulo, con una magnitud de 3,16 kN-m. El peso propio y la carga viva generan un momento flector de 0,10 kN-m.

A partir del valor del momento máximo obtenido en el apartado anterior, es posible evaluar el espesor mínimo de la losa, teniendo en cuenta tanto la deflexión como el esfuerzo de flexión máximo.

Tabla 47. Análisis de losa. Simplificación del sistema y resultados.

 <p>Carga Vehículo=2,63 kN x llanta x ml*</p>	 <p>Peso propio=13,9 kN/ml</p>  <p>Carga viva = 1,57 kN/ml</p>
<p>Esquema de cargas</p>  <p>Diagrama de esfuerzo cortante</p>  <p>Diagrama de momento flector</p> 	<p>Esquema de cargas</p>  <p>Diagrama de esfuerzo cortante</p>  <p>Diagrama de momento flector</p> 
<p>Cortante</p>	<p>Cortante</p>
<p>8,03 0 -17,71 0 17,71 0 -8,03</p>	<p>0,45 0 -0,76 0 0,76 0 -0,45</p>
<p>Momento flector</p>	<p>Momento flector</p>
<p>0 2,62 0 3,16 0 2,62 0</p>	<p>0 0,06 0 -0,10 0 0,06 0</p>
<p>$M_{max} = -3,16 \text{ kN}\cdot\text{m}$</p>	<p>$M_{max} = 0,10 \text{ kN}\cdot\text{m}$</p>
<p>* ml se refiere al ancho del modulo (1 m)</p>	

En la Figura 79 y en la Tabla 1 se puede observar que, El parámetro crítico para establecer el espesor de la losa es el esfuerzo cortante, graficado en función del cumplimiento del factor de seguridad mecánico (FSM). LA deformación máxima se supera a partir de un espesor mínimo de 40 mm mientras que para superar el criterio de FSM min se necesita un espesor mayor a 69 mm.

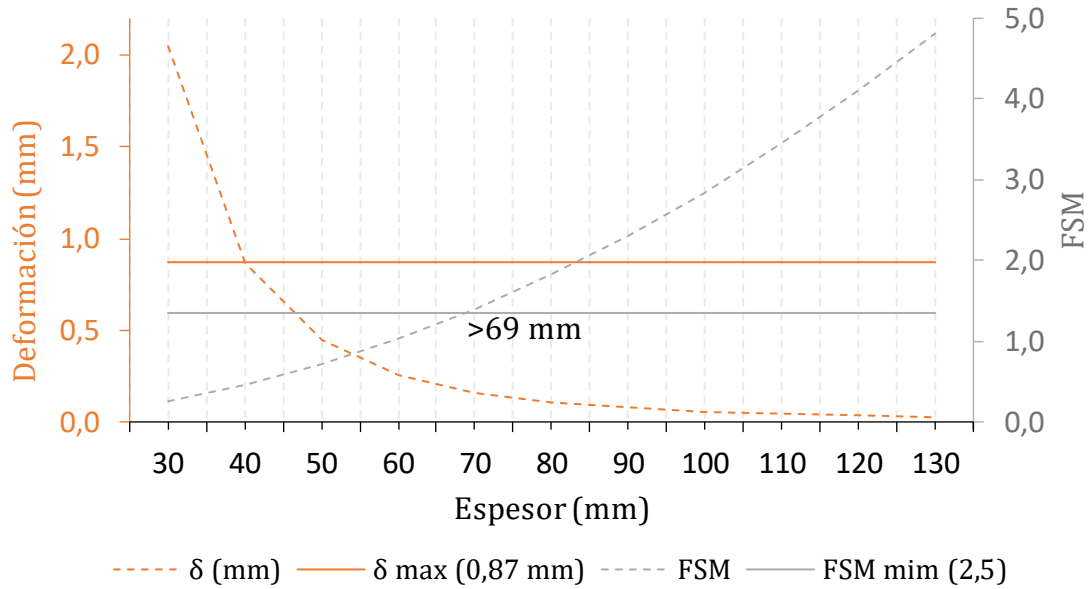


Figura 79. Análisis de espesor óptimo para la losa superior del módulo.

La deformación máxima del módulo es de 2,05 para un espesor de 30 mm que corresponde a un esfuerzo máximo de 2,1 MPa. Para que la losa fabricada con el MAA cumpla con los requisitos mencionados, debe tener un espesor mínimo de 69 mm.

Tabla 48. Resultados de caracterización del MAA de V-C+P.

Espesor losa	Inercia	Esfuerzo de flexión de losa	Factor de seguridad Mecánico	Deformación
	$b \cdot h^3 / 12$	$R_{f \text{ losa}} = M(e/2) / I$	Min=1,35 $R_{f \text{ mat}} / R_{f \text{ losa}}$	Max=0,87 $PL^3 / 48EI$
e (mm)	I (m ⁴)	σ (kN/m ²)	FSM	δ (mm)
30	2,25E-06	21075,51	0,26	2,05
40	5,33E-06	11854,97	0,46	0,86
50	1,04E-05	7587,18	0,71	0,44
60	1,80E-05	5268,88	1,02	0,26
70	2,86E-05	3871,01	1,39	0,16
80	4,27E-05	2963,74	1,82	0,11
90	6,08E-05	2341,72	2,31	0,08
100	8,33E-05	1896,80	2,85	0,06
110	1,11E-04	1567,60	3,44	0,04
120	1,44E-04	1317,22	4,10	0,03
130	1,83E-04	1122,36	4,81	0,03

En conclusión, se puede decir que, el momento máximo en la losa se produce debido a la acción del camión, y se da en el tabique central del módulo, con una magnitud de 3,16 kN·m. El peso propio y la carga viva generan un momento flector 30 veces menor.

Por último, para que la losa fabricada con el MAA cumpla con los requisitos mencionados, debe tener un espesor mínimo de 69 mm.

5.5.3 Alternativas de diseño

En este apartado, se presentan alternativas de diseño para el módulo prefabricado. Estas alternativas surgen principalmente para evaluar el impacto del uso de un hormigón permeable. Los diseños alternativos presentan nuevas geometrías que minimizan las deformaciones y los esfuerzos, además de permitir la optimización del volumen interno. Este parámetro es importante para la capacidad de filtración y para albergar instalaciones de servicios públicos urbanos.

5.5.3.1 Procedimiento

Para la modelación, se utilizó la misma discretización empleada en el apartado anterior (5.5.1). Se evaluaron los esfuerzos, deformaciones, pesos y volúmenes libres de cinco módulos. Los rangos de altura de los módulos variaron entre 55 y 35 cm. El espesor de la losa se aumentó hasta 10 cm. Se modelizó inicialmente un diseño básico y luego se realizaron modificaciones para generar 4 diseños adicionales y determinar la respuesta estructural de cada uno.

Para la simulación se toma como resistencia a la compresión 30.1 MPa y hormigón permeable de 17,5 MPa. Los dos valores corresponden con los ensayos experimentales realizados y los valores de la literatura respectivamente.

5.5.3.2 Resultados

5.5.3.2.1.1 Diseño 0

Este diseño consiste en un módulo compuesto por tres elementos: un cajón en forma de U de hormigón, con una única losa intermedia en su parte central y una losa superior para circulación. El módulo tiene un ancho total de 1,5 m, una altura de 0,55 m y una longitud de 2 m. El cajón es de hormigón en masa y tiene un espesor de 0,15 m en las paredes y la base del cajón. La losa superior es de hormigón permeable y tiene un espesor de 0,10 m, mientras que la losa intermedia tiene un espesor de 0,03 m y su material es hormigón permeable.

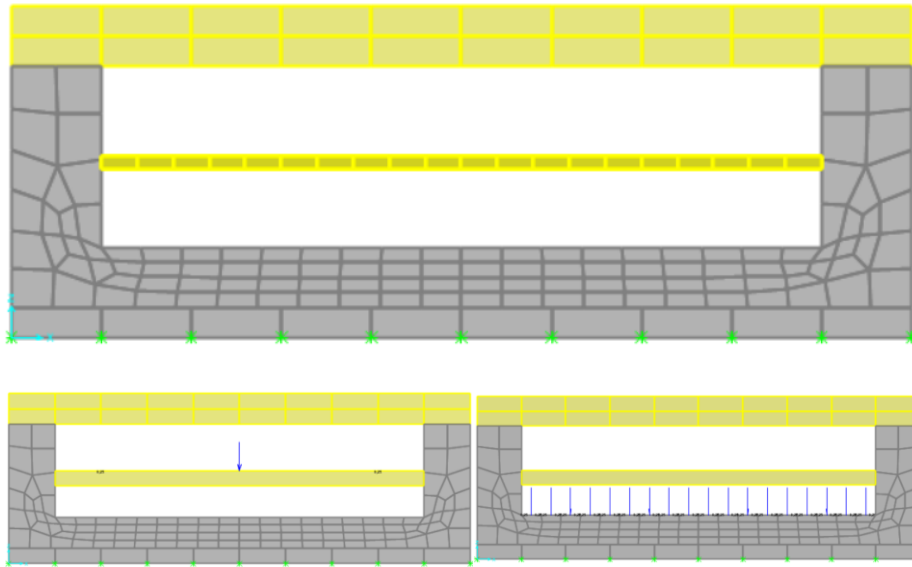


Figura 80. Diseño 1.

Los resultados de la simulación y el análisis muestran que la deformación máxima se localiza en el borde frontal de la losa intermedia, con una magnitud de 4,1 mm. El espacio libre en este diseño es de 0,40 m³.

5.5.3.2.1.2 Diseño 1

El diseño 1 está compuesto por cinco elementos: un cajón en forma de U de hormigón modificado, con una única losa intermedia en su parte central, soportada por dos elementos tipo vigas centrales ubicadas debajo del cajón, y una losa superior que cierra el módulo en la parte superior. El módulo tiene un ancho total de 1,5 m, una altura de 0,35 m y una longitud de 2 m. El cajón es de hormigón en masa y tiene un espesor de 0,15 m en las paredes y la base del cajón, y 0,05 m en las paredes de soporte de la losa superior. La losa superior es de hormigón permeable y tiene un espesor de 0,10 m, mientras que la losa intermedia tiene un espesor de 0,05 m y su material es hormigón permeable.



Figura 81. Diseño 1.

El espacio libre es de $0,23 \text{ m}^3$. La deformación máxima se localiza en el borde central de la losa superior y es de $1,4 \text{ mm}$.

5.5.3.2.1.3 Diseño 2

El diseño 2 está compuesto por cuatro elementos octagonales de hormigón con una cavidad hueca que permite el paso de instalaciones de servicios. También se utilizan seis losas de $0,05 \text{ m}$ de espesor de hormigón permeable para el paso del agua filtrada, una losa superior de hormigón permeable de $1,5 \text{ m}$ de ancho para la circulación de bicicletas y una losa base de iguales dimensiones, pero de hormigón en masa, para el apoyo del módulo en el suelo. Se contempla la posibilidad de levantar tanto la losa superior como la primera base de filtros para facilitar la limpieza del módulo.

El espacio libre es de $0,20 \text{ m}^3$. La deformación máxima se localiza en el borde central de la losa superior y es de $1,4 \text{ mm}$.

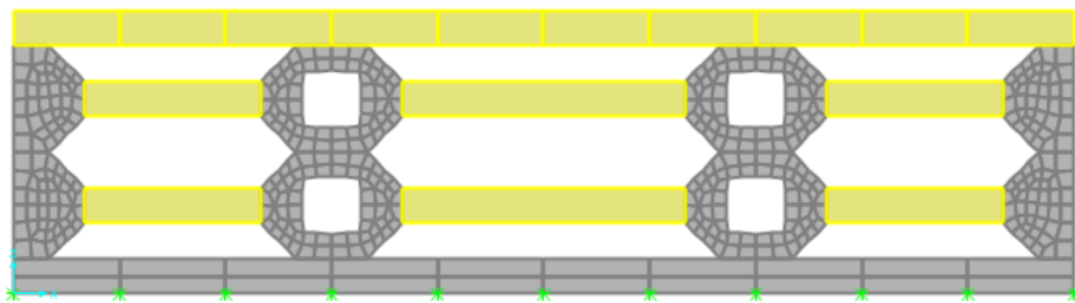


Figura 82. Diseño 2.

5.5.3.2.1.4 Diseño 3

El diseño 3 está compuesto por piezas rectangulares de hormigón con cavidades para el paso del agua filtrada. Consta de diez losas internas de $0,05 \text{ m}$ de espesor de hormigón permeable, una losa superior de hormigón permeable de $1,5 \text{ m}$ de ancho para la circulación de bicicletas y una losa base de iguales dimensiones, pero de hormigón en masa, para el apoyo del módulo en el suelo. También se contempla la posibilidad de levantar tanto la losa superior como la primera base de filtros para facilitar la limpieza del módulo.

El espacio libre es de $0,20 \text{ m}^3$. La deformación máxima se localiza en el borde central de la losa superior y es de $1,5 \text{ mm}$.

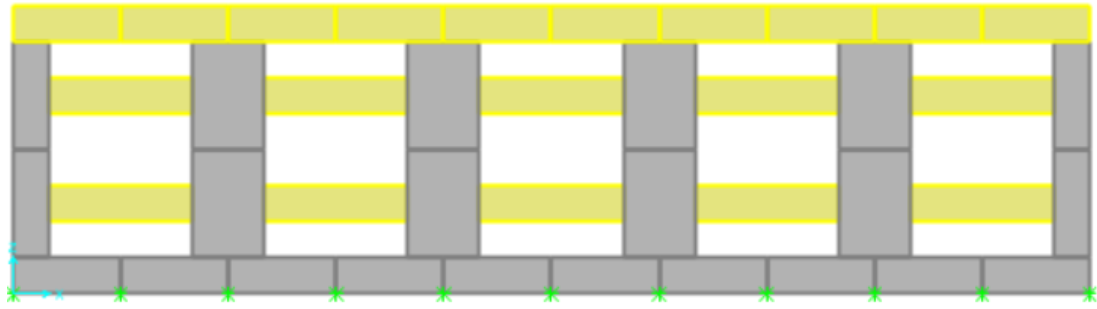


Figura 83. Diseño 3.

5.5.3.2.1.5 Diseño 4

El diseño 4 está compuesto por un cajón de hormigón con dos cavidades en forma de V para la filtración del agua. Consta de una sola losa de 0,05 m de espesor de hormigón permeable de 1,5 m de ancho para la circulación de bicicletas, y una losa base de iguales dimensiones, pero de hormigón en masa, para el apoyo del módulo en el suelo.

El espacio libre es de $0,37 \text{ m}^3$. La deformación máxima es de 1,6 mm.

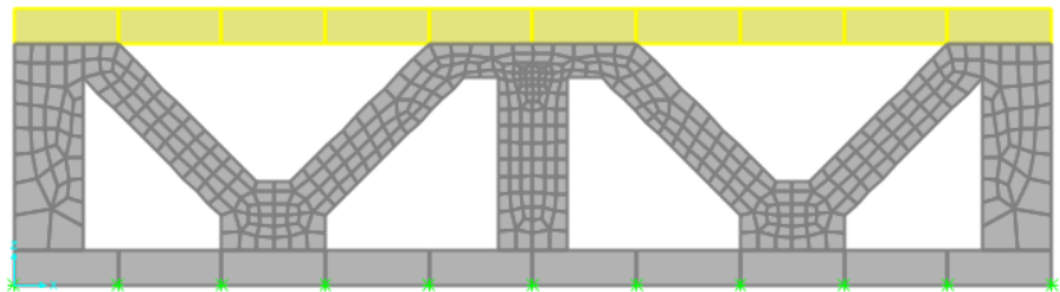
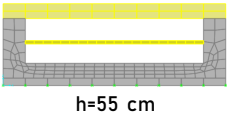
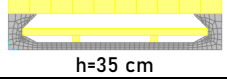
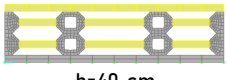
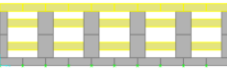
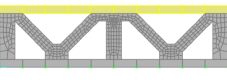


Figura 84. Diseño 4.

En resumen, el diseño 0 presenta bajos esfuerzos y deformaciones, pero el volumen de filtros es bajo. El diseño 1 reduce considerablemente los esfuerzos, pero el volumen de filtros se reduce casi a la mitad en comparación con el diseño 0. Los diseños 2 y 3 tienen geometrías regulares que reducen significativamente los esfuerzos, pero cuentan con muchos compartimentos para filtros, lo que puede plantear problemas de limpieza. El diseño 4 permite tener un gran volumen libre, pero los esfuerzos no se reducen de manera significativa, y su geometría es bastante irregular, lo que dificultaría su construcción.

Tabla 49. resumen de resultados de los 5 diseños.

Diseño	Esquema	δ Max=2 mm (mm)	E. Max (kN/m ²)	Cortante (kN/m ²)	Peso (Ton)	Volumen libre (m ³)
0	 h=55 cm	4.1	6664	1759	2,07	0,40
1	 h=35 cm	1.4	3601	311	0,70	0,23
2	 h=40 cm	1.5	5147	1035	1,61	0,20
3	 h=40 cm	1.5	3531	438	1,63	0,20
4	 h=40 cm	1,6	4921	1858	1,54	0,37

5.5.4 Sumario

La carga crítica para el módulo prefabricado es la carga debida al paso eventual del camión de limpieza. El elemento crítico del prefabricado es la losa superior, la cual presenta un esfuerzo a flexión máximo de 4,16 MPa.

Los esfuerzos de flexión no superan la capacidad a flexión del material ($4,16 < 6,4$ MPa a flexión). Sin embargo, al revisar los límites establecidos en cuanto a flecha máxima y factor de seguridad del material, se concluye que el espesor de 50 mm no cumple con las cargas proyectadas.

Para cumplir con los requisitos de la normativa en cuanto al factor de seguridad del material y la deflexión máxima, se determina que el espesor mínimo de la losa debe ser superior a los 69 mm.

Al emplear hormigón permeable el espesor de la losa debe aumentar hasta 10 cm pero aun así, las deflexiones superan 1,4 mm mientras que con el MAA no superan los 0,16 mm.

5.6 MAA ALTERNATIVO

Como último experimento del trabajo doctoral se planteó la consecución de un MAA alternativo para cumplir en mayor medida con los requerimientos de implementación. El contenido de Ca y Al de un precursor rico en SiO₂ como el V-C+P es bajo (10% y 2%). Después de la activación química, sin una fuente adicional de Ca se produce la

formación de gel de sílice principalmente en lugar de C-S-H el cual aporta la resistencia en el hormigón tradicional [105].

Teniendo en cuenta lo anterior y para incluir los subproductos cerámicos caracterizados en el capítulo 3 se planteó obtener otro MAA haciendo las siguientes modificaciones:

1. Mezclar los precursores cerámicos RDC y TC con un 30% de V-C+P.
2. Disminuir la finura del material hasta alcanzar un $D_{50}=0,12$ mm del V-C+P. Con esta modificación y con la finura del RDC y TC se supera el criterio de superficie específica mayor a 275 m²/kg exigidos por la norma, debido a que los cerámicos tienen superficies específicas por encima de 3000 m²/kg.

De esta manera, se elimina el uso de cemento, se incluye mayor cantidad de silicio amorfo a estos componentes cerámicos y se eleva la superficie específica.

5.6.1 Procedimiento

Especímenes cúbicos de 40x40x40 mm fueron elaborados con L/S=0,35. Las proporciones de mezcla se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50. Dosificación de muestras para combinación de precursores.

Material	Precursor (kg)	Solución (L)	WG (L)	Árido fino (kg)
<i>Descripción</i>	V-C+P D50=0.12 mm	NaOH 5M	Silicato de sodio EssentQ® (70,2 % SiO2 y 2,5 % Na2O)	Arena Sílice SF 0.3/0.4
RDC	1344	-	587	13,4
TC	1344	-	485	13,4
V-C+P	-	1344	485	13,4
RDC+30V-C+P	940,8	403,2	485	13,4
TC+30V-C+P	940,8	403,2	485	13,4



Figura 85. Imágenes de procedimientos probetas combinadas con 30% de V-C+P.

Las muestras fueron ensayadas a compresión a los 48 días y luego de un año y medio (555 días).

5.6.2 Resultados

Los resultados muestran que al agregar un 30% de V-C+P el RDC se registra un aumento de la resistencia de 453% y el TC un 339% alcanzando los 24.6 y 33.1 MPa respectivamente.

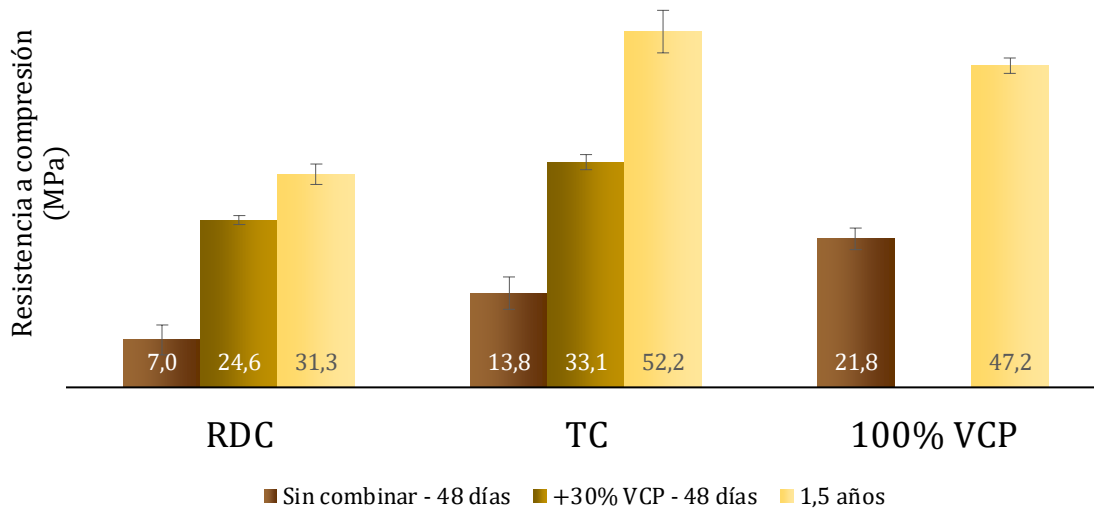


Figura 86. Resultados de combinación de residuos.

A pesar del aumento, el RDC y el TC combinados y sin combinar presentan una resistencia a la compresión inferior a la alcanzada por el V-C+P (21,8 MPa). Sin embargo, las muestras fueron ensayadas a luego de un año y medio y se encontró un aumento importante de la resistencia en todos los materiales y la combinación TC+30V-C+P supero en un 10,6% al V-C+P alcanzando los 52.2 MPa. Es destacable el aumento de la resistencia con la edad para todas las muestras. Entre los 48 y los 555 días El RDC+30V-C+P aumentó su resistencia un 27,23 % el TC+30V-C+P un 52.2 % y el V-C+P un 23.88 %.

En cuanto a la trabajabilidad se encontró que para las muestras de TC hubo una reducción de la trabajabilidad de un 17.58% y para el RDC la medida de flujo permaneció prácticamente igual (reducción de 1.26%). Los dos materiales sin combinar, tienen una fluidez promedio de 181.93 mm mientras que la pasta de V-C+P tienen un flujo de 280.55 mm lo que es un 54% mayor.

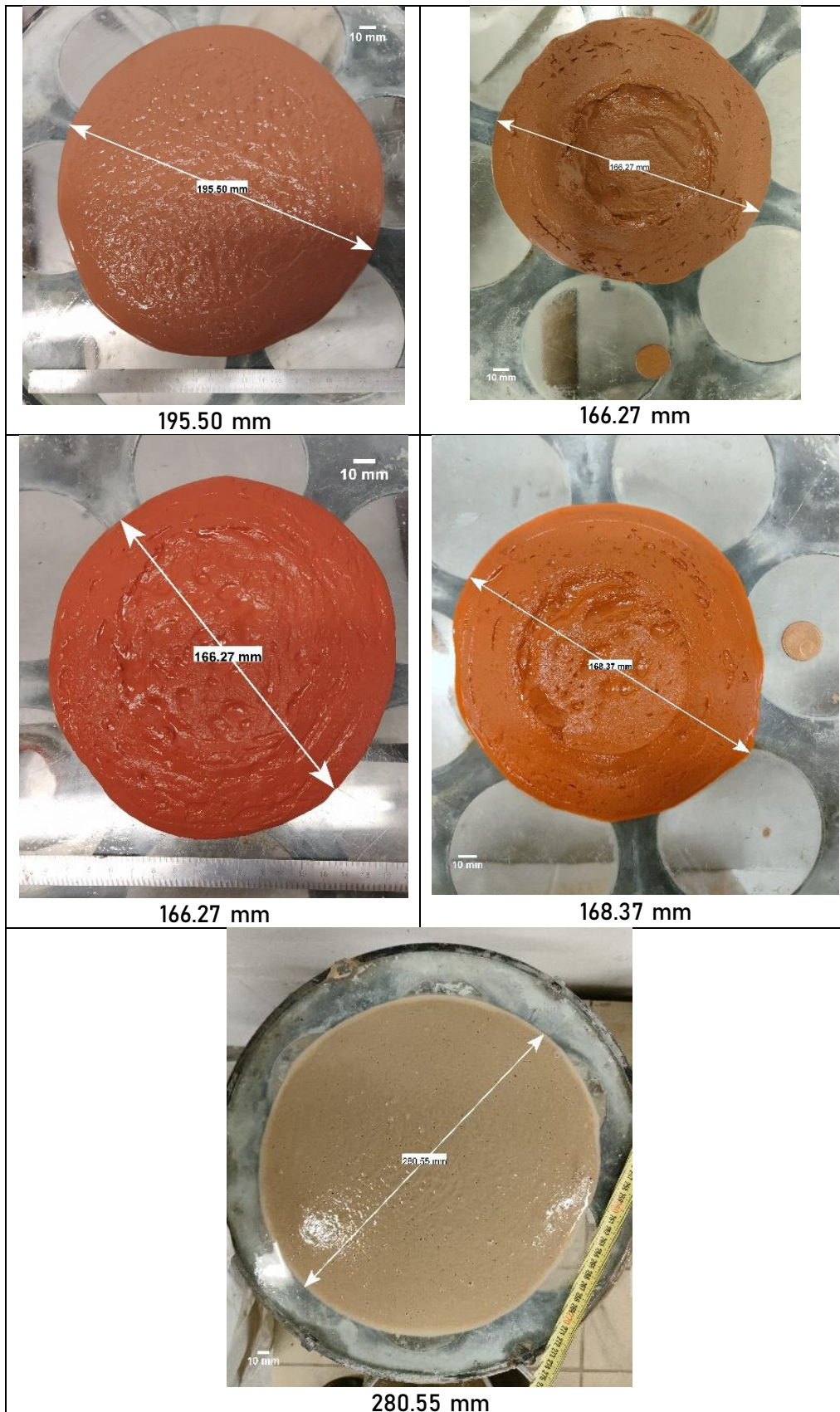


Figura 87. Cambios en el flujo en probetas combinadas con 30% de V-C+P.

5.6.3 Sumario

El MAA alternativo obtenido permite equilibrar la falta de silicio de los RDC y los TC y la falta de calcio del V-C+P. El calcio puede tener un efecto positivo en la geopolimerización y en la resistencia a la compresión de los materiales formados. Esto se debe a que proporciona sitios de nucleación adicionales para la precipitación de especies disueltas, lo que da como resultado una disminución de la porosidad y la formación de gel amorfo de Ca-Al-Si, que fortalece el producto final [80].

5.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5

En esta última parte del trabajo doctoral se llevaron a cabo análisis experimentales y cálculos apoyados en simulaciones para determinar la capacidad estructural de prefabricados empleando como cementante un MAA. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Los prefabricados deben cumplir con dos límites principales con respecto al material: Una resistencia del material que cubra un factor de seguridad mínimo de 1,35 y una superficie específica mínima de $275 \text{ m}^2/\text{kg}$. En el presente trabajo, la primera condición pudo ser superada por el buen comportamiento mecánico del MAA. Sin embargo, la superficie específica fue un 80% inferior a lo que se exige. Esta última limitación fue debida principalmente a la escala del proyecto y puede ser superada con un escalado industrial adecuado, ya que la molienda de material es un procedimiento ampliamente usado en las grandes industrias.
- En cuanto a la composición química, las normativas legales no permiten el uso de un MAA como cementante principal. Aun si se decidiera usar el precursor V-C+P como adición, no cumple con la relación $(\text{CaO}+\text{MgO}) / \text{SiO}_2$ la cual debe ser superior a 1. Lo anterior es debido a su alto contenido de silicio.
- El prefabricado de MAA, además de soportar los esfuerzos mínimos resistentes, debe cumplir con el criterio de deformación mínima inferior a $L/750$. El módulo de elasticidad del material, es muy cercano al del hormigón tradicional, lo que permitió que superara fácilmente este criterio. El Factor de seguridad de la resistencia a flexión es un parámetro que condiciona el espesor mínimo de los elementos del prefabricado y por lo tanto el diseño.
- El MAA obtenido en el apartado 4 superó los 25 MPa a compresión pero aplicando el factor de seguridad mínimo de 1,35 se reduce su rango de aplicación. Adicionando un 10% de cemento como reemplazo del precursor y fibras, se obtuvo un MAA con resistencia a la compresión 41 MPa y de 6,4 MPa a flexión. Con estos valores de resistencia mecánica, las piezas fabricadas se podrían emplear en 14 de los 18 ambientes de exposición establecidos.
- En cuanto al análisis estructural del módulo, la carga y el elemento crítico fueron el camión de limpieza y la losa superior respectivamente. Los esfuerzos de flexión no superan la capacidad de la losa ($4,16 < 6,4 \text{ MPa}$ a flexión) pero el espesor de la losa superior, debe ser superior a los 69 mm. Al emplear

hormigón permeable el espesor de la losa debe aumentar considerablemente y las deflexiones superan 1,4 mm mientras que con el MAA no superan los 0,16 mm.

- Las alternativas de diseño reducen en alguna medida esfuerzos y el peso del módulo. Sin embargo, es difícil mantener un volumen libre mayor a 0.37 m^3 . Esto podría ser una desventaja para su uso en suelo urbano desarrollado, debido a que se necesita dar paso a instalaciones como tuberías y cableados de servicios.
- Un MAA a base de la mezcla de un 30% de V-C+P con el TC es una alternativa que permite equilibrar la falta de silicio del cerámico y la falta de aluminio del V-C+P. La formulación anterior da como resultado un material con más de más de 40 MPa que cumple con los requisitos de finura de la norma y elimina el contenido de cemento.

5.8 ANEJOS DEL CAPÍTULO 5

5.8.1 Anejo 10. Métodos de molienda a pequeña escala

Ghasan et al. 2018 molturaron materiales cerámicos provenientes de desechos de la construcción industrial para activación alcalina. La cerámica se trituró y tamizó con 600 μm y luego se molió en una máquina de Los Ángeles durante 6 h para obtener un polvo de cerámica con un tamaño de partícula inferior a 20 μm [106].

Nuno Cristelo et al. 2020 acondicionaron cenizas volantes en su investigación. Ellos realizaron un minucioso proceso de molienda, utilizando una máquina de prueba de abrasión de Los Ángeles (LAM) y un molino de bolas de sobremesa, con un cuenco cerrado de cerámica de 500 ml y 27 bolas de circonio de diferentes diámetros. El material original se tamizó inicialmente en un tamiz de 25 mm para eliminar las partículas grandes, no muy afectadas por la etapa de incineración. El material que pasó se sometió luego a 15 minutos en Los Ángeles y se tamizó nuevamente, esta vez en el tamiz de 4 mm. Las partículas menores de 4 mm se trituraron en el molino de bolas (280 g de material en cada corrida), durante 15 min, a 300 rpm. El material resultante se tamizó en 0.250 mm, y las partículas más pequeñas se sometieron nuevamente a 30 min en el molino de bolas (300 rpm), pero esta vez solo se molieron 140 g en cada corrida [107].

Ziyad Kubba et al 2018 molieron ceniza de combustible de aceite de palma con la máquina Los Ángeles hasta alcanzar una granularidad de 10 μm . Al alcanzar las 12.600 revoluciones después de 6 h. Como último paso la puzolana se pasó por un tamiz de 45 μm . Con esta metodología el material cumplió con la granulometría requerida por encima del 66 %.

Ghassan y Hilmi 2010 Investigaron el efecto de la molienda del residuo de cascara de arroz. Emplearon la máquina de Los Ángeles para moler el material. El tiempo de molienda era ajustable en el rango de (90 - 360 minutos). Dentro de la maquina se depositaron 40 varillas de acero de 10 mm de diámetro por 500 mm de largo para moler la ceniza. El molino tuvo un máximo de 5 kg de ceniza y esta cantidad se mantuvo constante cada vez que se utilizó el molino según la finura requerida. Según los resultados muestra una reducción del tamaño de partícula de 70 μm a 10 μm en un periodo de 6h [108].

La revisión anterior nos muestra que La Máquina de los ángeles es un equipo comúnmente empleado para la reducción de tamaño de partícula en investigaciones previas. Por otro lado, es un equipo con el que se encuentra fácilmente y del que se disponía para la presente investigación. Sin embargo, en la mayoría de investigaciones anteriores el tipo de materiales como escorias y cenizas tienen ya un tamaño de partícula inferior al milímetro mientras que el precursor escogido V-C+P tiene un tamaño de partícula inicial de 20 mm. Teniendo en cuenta esto se deben buscar las condiciones óptimas de operación.

Según Mellmann 2001 [109] , el régimen de movimiento que tiene lugar en el interior del recipiente depende principalmente del coeficiente de fricción de la pared, la relación de llenado del recipiente y el número de Froude. La máquina de los ángeles no puede ser manipulada en cuanto a su capacidad y velocidad de rotación, pero sí es posible cambiar el volumen de material y el tipo de elementos que se le incluyen durante la molturación.

En la práctica, se ha demostrado que en estos equipos rotatorios de bolas, en lugar de cargar un solo tamaño de bola, generalmente se agrega una gama de tamaños de bola. Al hacerlo, el espacio entre las bolas se llena con bolas de menor tamaño, lo que promueve la eficiencia de la molienda [110] [111].

En cuanto a la cantidad de material, de acuerdo con investigaciones previas [111][112] es recomendable hacer funcionar el molino con un 30% de llenado de bolas y un 20% de volumen de material.

Partiendo de la revisión anterior se empleó la Máquina de los Ángeles para moler el material. esta máquina es estándar para determinar la resistencia a la abrasión de los agregados gruesos. Consta de un tambor giratorio con una abertura en la parte superior; dentro del tambor hay esferas de acero de 46.8 mm de diámetro y pesan entre 390 y 445 g. Dichas esferas desgastan el material durante el ensayo. Para el ensayo la máquina puede contener hasta 5 kg de material descrita en la UNE EN 1097-2:2021.

Para mejorar el proceso de molienda se planteó incluir otro tipo de esferas de acero de menor diámetro durante la molturación. Para esto se incluyeron bolas de acero de 9,5 mm durante la molturación.

5.8.2 Anejo 11. Cálculo de parámetros de molienda

Los Angeles dimention		Balls dimention		Materials Density	
length	0,508 m	Number	1090 -	V-C+P	2022 kg/m3
Diameter	0,711 m	diameter	0,047 m	TC	1654 kg/m3
volumen	0,20 m3	volume	0,04388 m3	Material	V-C+P
		weight	455,08 kg		
Percent of the mill volume occupied by rock				V_r	11,5 %
mass of rock	47 kg	volume of rock	0,0232 m3		
Density of rock	2022 kg/m3	mill volume	0,20 m3		
mill volume	0,20				
	V_r	V_r	11,52		
Percent mill volume occupied by the griding media (balls)				V_b	21,8 %
Volume of balls	0,0439 kg	volume of griding balls	0,04388 m3		
mill volume	0,20 m3	mill volume	0,20 m3		
	V_b	V_b	21,75 kg/m3		
Fraction of the mill volume occupied by the bulk rock charge				J_r	16,5
φ	0,3	30–40% bed porosity is common.			
mass rock	47 kg				
density of rock	2022 kg/m3				
	J_r	16,46			
The fraction of the mill volume occupied by the bulk ball charge				J_b	31,1
φ	0,3	30–40% bed porosity is common.			
balls volume	0,04388 m3				
	J_b	31,1			
			j_r/j_b	0,53	SUGERIDO 0,4

5.8.3 Anejo 12. Cálculo de momentos máximos y cortante en la losa prefabricada

El cálculo de la losa se hace aplicando el método de los 3 momentos. En dicho método la losa se divide en dos tramos con longitud L_a y L_{a+1} y tres apoyos $a-1$, a y $a+1$. En el punto central la deflexión de la viga genera dos ángulos de giro α y β que pueden tener dirección de giro hacia la derecha o izquierda y corresponder a condición isostática o hiperestática (α_i , α_h , β_i y β_h). D y d son las distancias al centro de gravedad. Los esfuerzos se representan por áreas de momentos flectoras en el primer (Ω_a) y segundo tramo. (Ω_{a-1}). En cada apoyo se generan 3 momentos M_{-1} , M y M_{+1} los cuales también son representados en áreas equivalentes.

La losa apoyada se puede analizar a partir de dos condiciones. En la primera condición la viga se comporta como una viga en voladizo y se puede considerar una estructura isostática. Las estructuras isostáticas se resuelven con la aplicación de las ecuaciones de la estática. En ellas se determinan las reacciones en los apoyos, a partir de los cuales se calcula la distribución momentos flectores y de esfuerzos cortante. La carga hiperestática supone que la viga está apoyada en un extremo y empotradas en el otro. Para resolverlas, además de utilizar las ecuaciones de equilibrio, se han de considerar las ecuaciones de compatibilidad de las deformaciones.

La derivada de la curva elástica de la viga ancha (losa) es una función continua, por lo tanto, la tangente es única en cualquier apoyo. Partiendo de lo anterior, en el apoyo a , el ángulo girado izquierda es igual al ángulo girado a la derecha:

Ecuación 3

$$\alpha_i + \alpha_h = \beta_i + \beta_h$$

Aplicando el 2º Teorema de Mohr en el tramo de viga entre los apoyos $a-1$ y a , tomando como referencia el apoyo $a-1$:

Ecuación 4

$$\alpha_i L_a = \frac{\Omega_a D_a}{EI} \quad \text{isostática}$$

Ecuación 5

$$\alpha_h L_a = \frac{1}{EI} \left(\frac{M_a L_a}{2} \frac{2 L_a}{3} + \frac{M_{a-1} L_a}{2} \frac{L_a}{3} \right) \quad \text{hiperestática}$$

Aplicando el 2º Teorema de Mohr para el tramo entre los apoyos a y $a+1$, respecto del apoyo $a+1$:

Ecuación 6

$$\beta_i L_{a+1} = \frac{\Omega_{a+1} d_{a+1}}{EI} \quad \text{isostática}$$

Ecuación 7

$$\beta_h L_{a+1} = \frac{1}{EI} \left(\frac{M_a L_{a+1}}{2} \frac{2 L_{a+1}}{3} + \frac{M_{a+1} L_{a+1}}{2} \frac{L_{a+1}}{3} \right) \quad \text{hiperestática}$$

Sustituyendo en Ecuación 3 el valor de α_i , α_h , β_i y β_h de las ecuaciones anteriores:

Ecuación 8

$$\frac{\Omega_a D_a}{EIL_a} + \frac{2M_a L_a}{6EI} + \frac{M_{a-1} L_a}{6EI} = - \left(\frac{\Omega_{a+1} d_{a+1}}{EIL_{a+1}} + \frac{2M_a L_{a+1}}{6EI} + \frac{M_{a+1} L_{a+1}}{6EI} \right)$$

Simplificando se obtiene la ecuación del teorema de los tres momentos Ecuación 9.

Ecuación 9

$$M_{a-1} L_a + 2M_a (L_a + L_{a+1}) + M_{a+1} L_{a+1} = -6 \left(\frac{\Omega_a D_a}{L_a} + \frac{\Omega_{a+1} d_{a+1}}{L_{a+1}} \right)$$

Esta ecuación se desarrolla para cada tramo y es posible obtener los valores de momentos y cortantes en cada punto de la viga ancha.

5.8.4 Anejo 13. Imágenes de modelación de alternativas de módulos SAP2000

5.8.4.1 Diseño 0

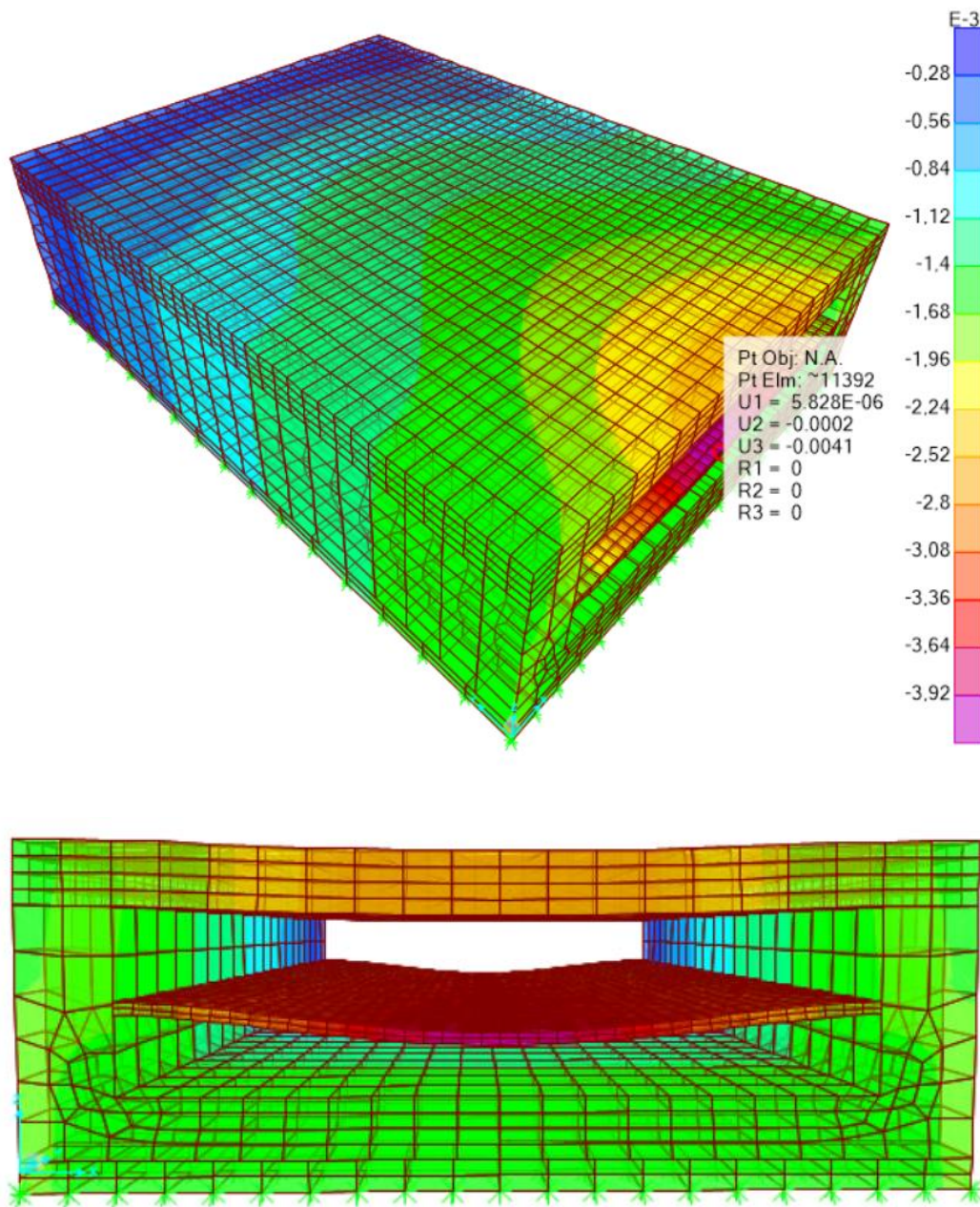


Figura 88. Deformaciones (m) diseño 0.

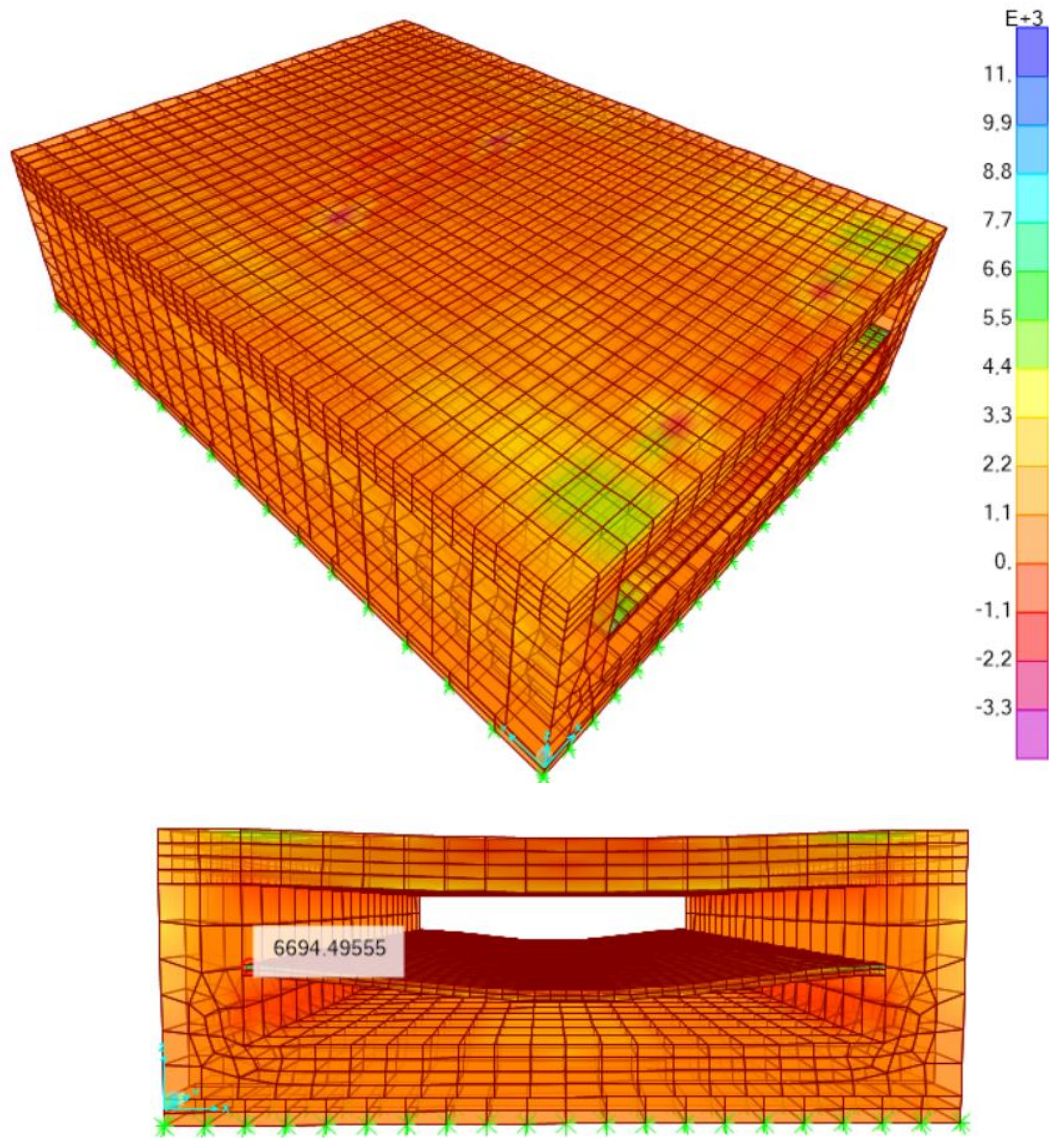


Figura 89. Esfuerzo máximo S_{max} (kN/m²) diseño 0.

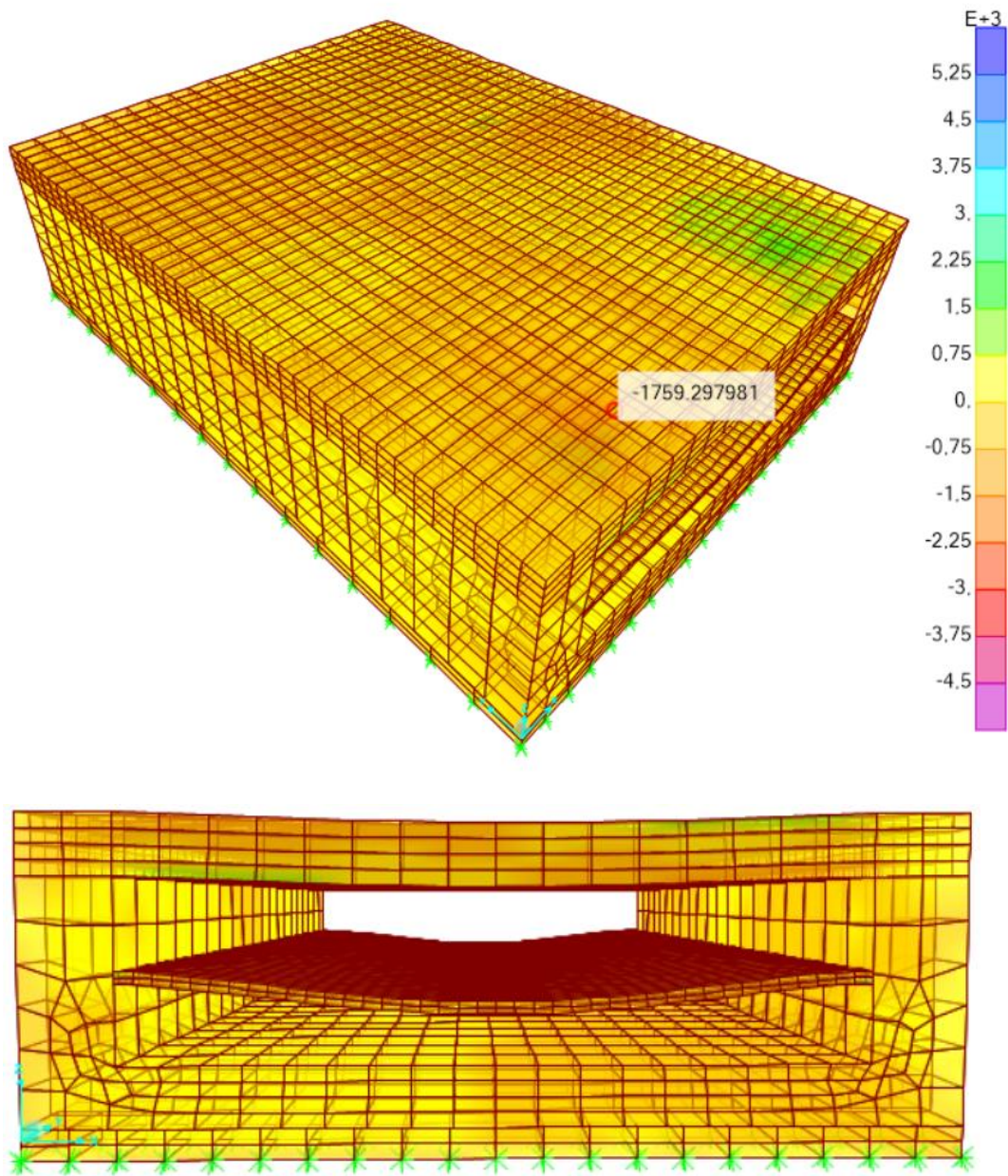


Figura 90. Esfuerzo cortante S12 (kN/m²) diseño 0

5.8.4.2 Diseño 1

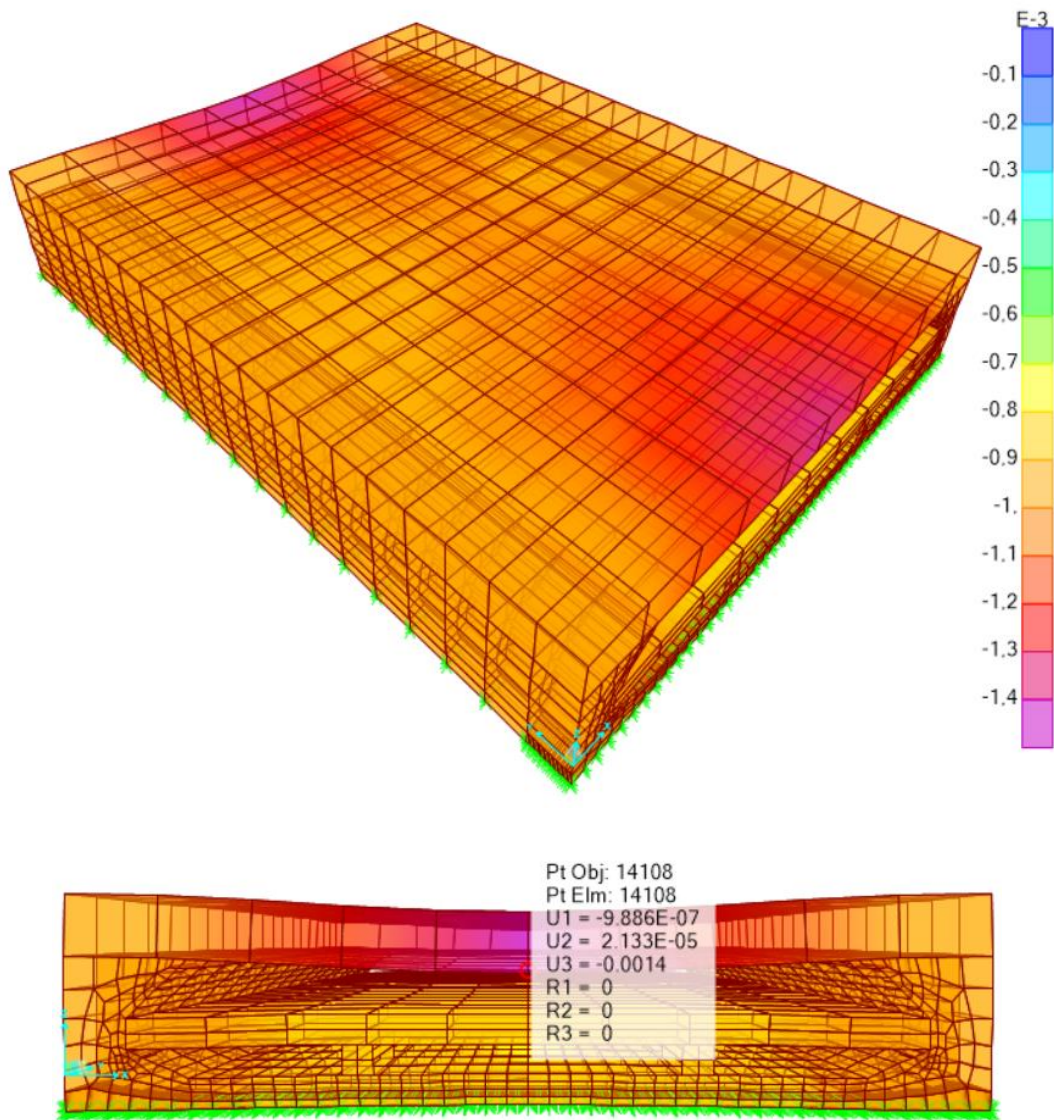


Figura 91. Deformaciones (mm) diseño 1.

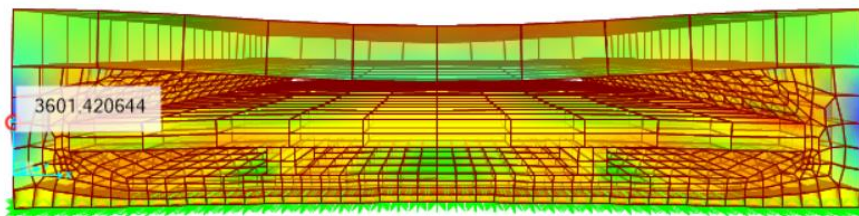
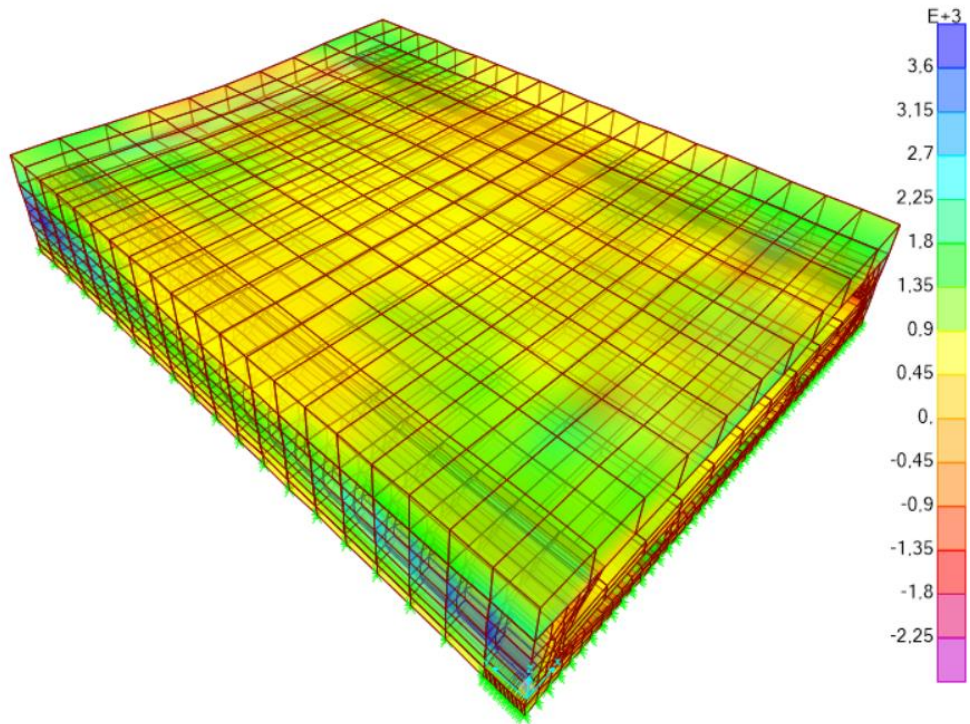
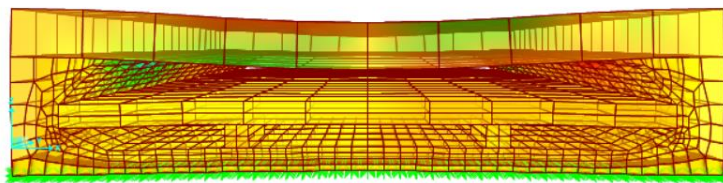


Figura 92. Esfuerzo máximo SMax (kN/m²) diseño 1.



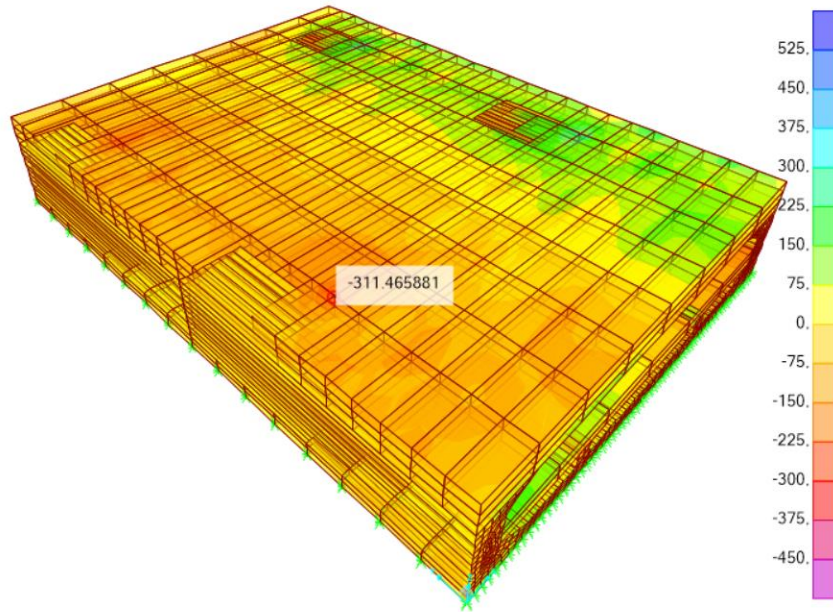


Figura 93. Cortante S_{12} (kN/m^2), diseño 1.

5.8.4.3 Diseño 2

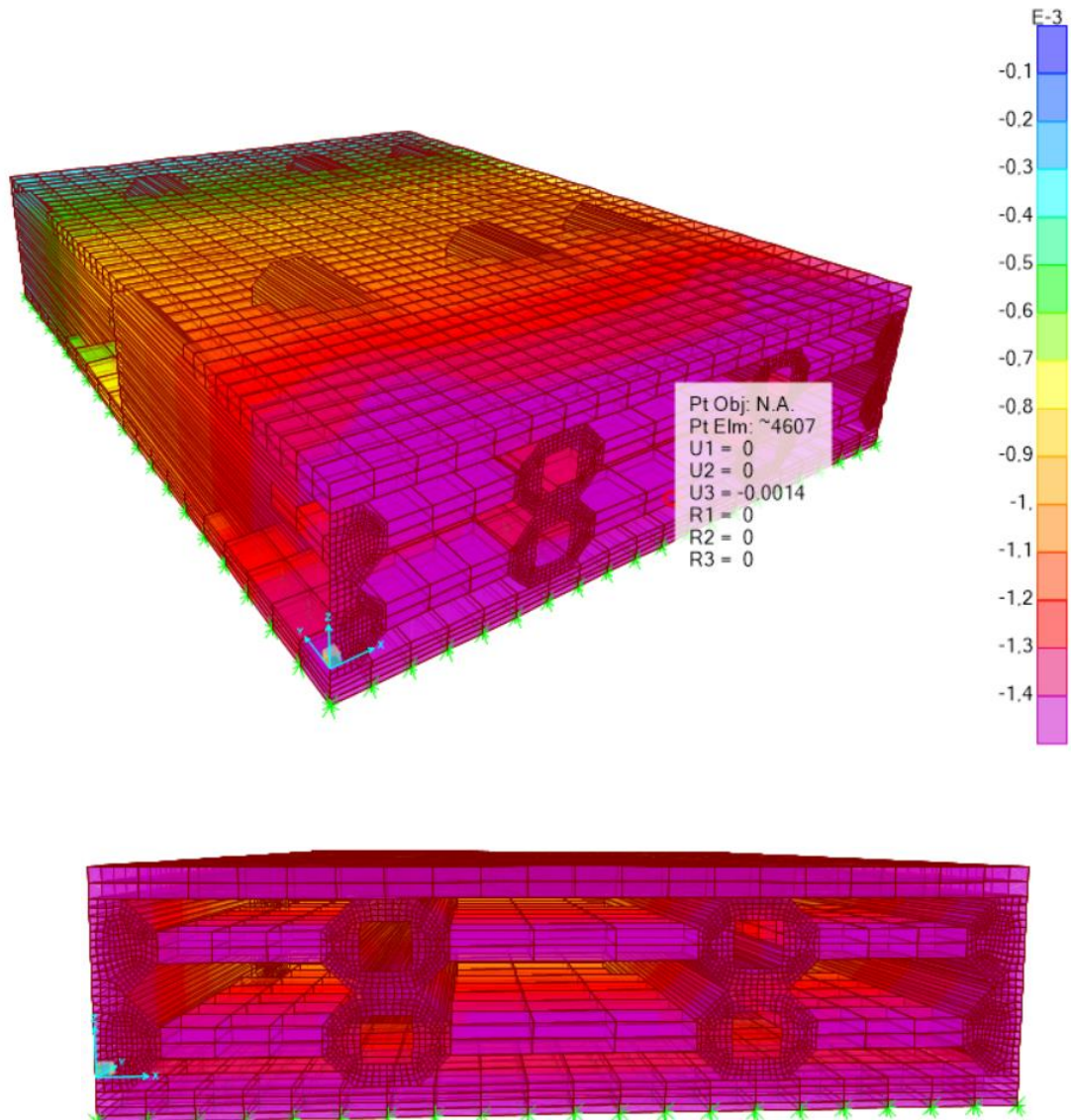


Figura 94. Deformación máxima (mm), diseño 2.

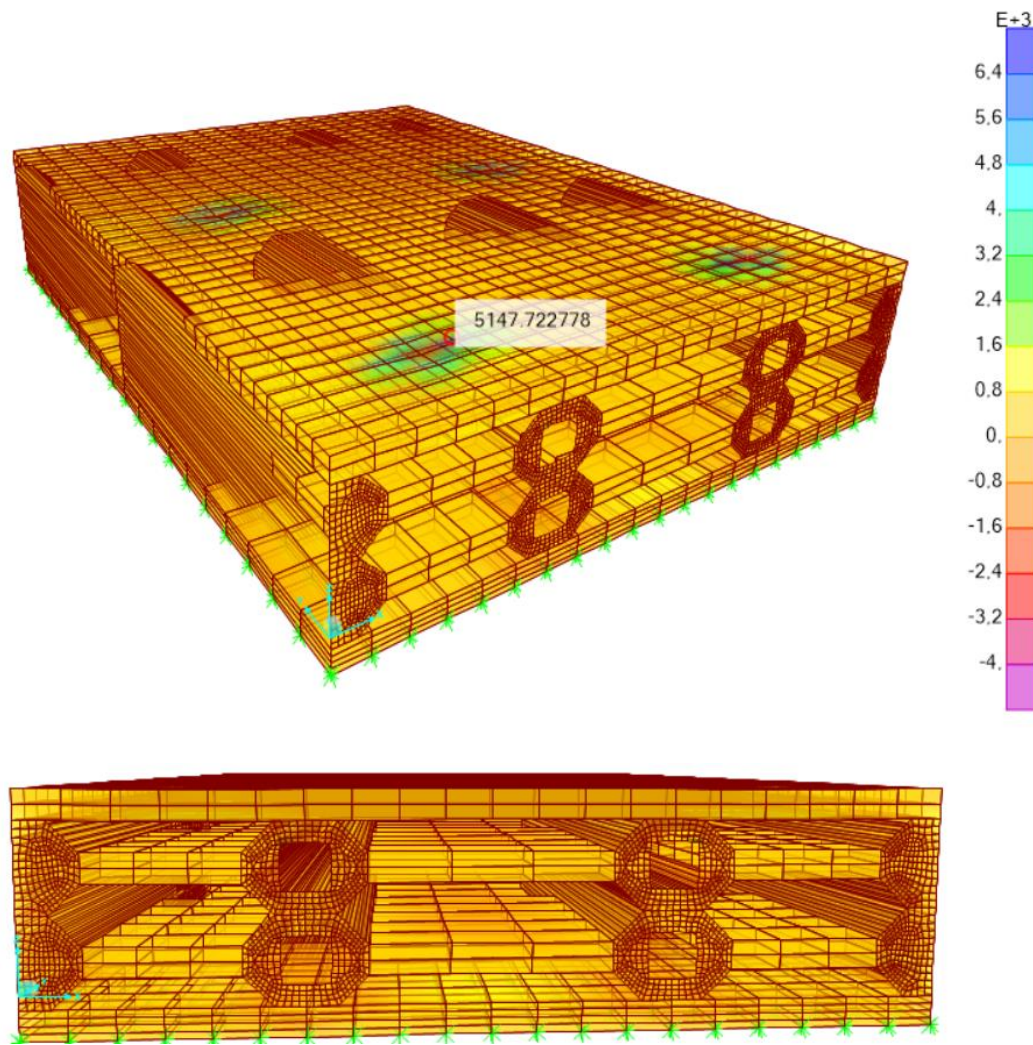


Figura 95. Esfuerzo máximo S_{max} (kN/m²), diseño 2.

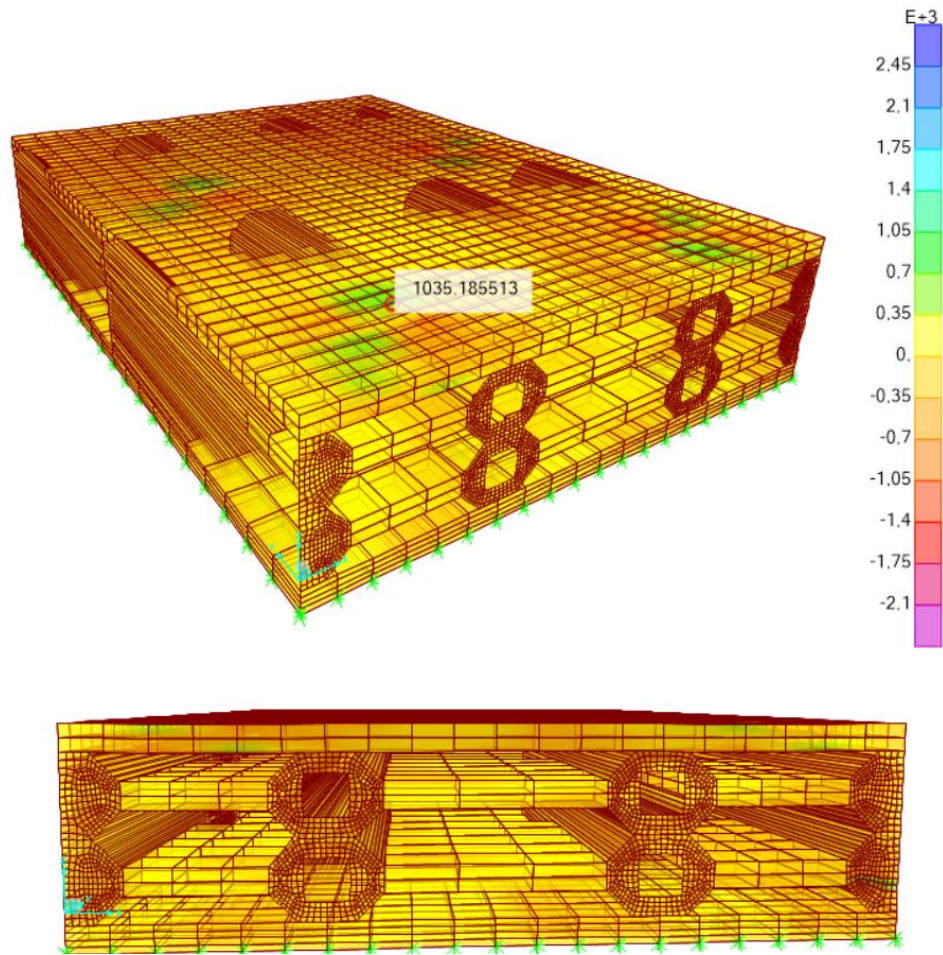


Figura 96. Esfuerzo Cortante S12 (kN/m²), diseño 2.

5.8.4.4 Diseño 3

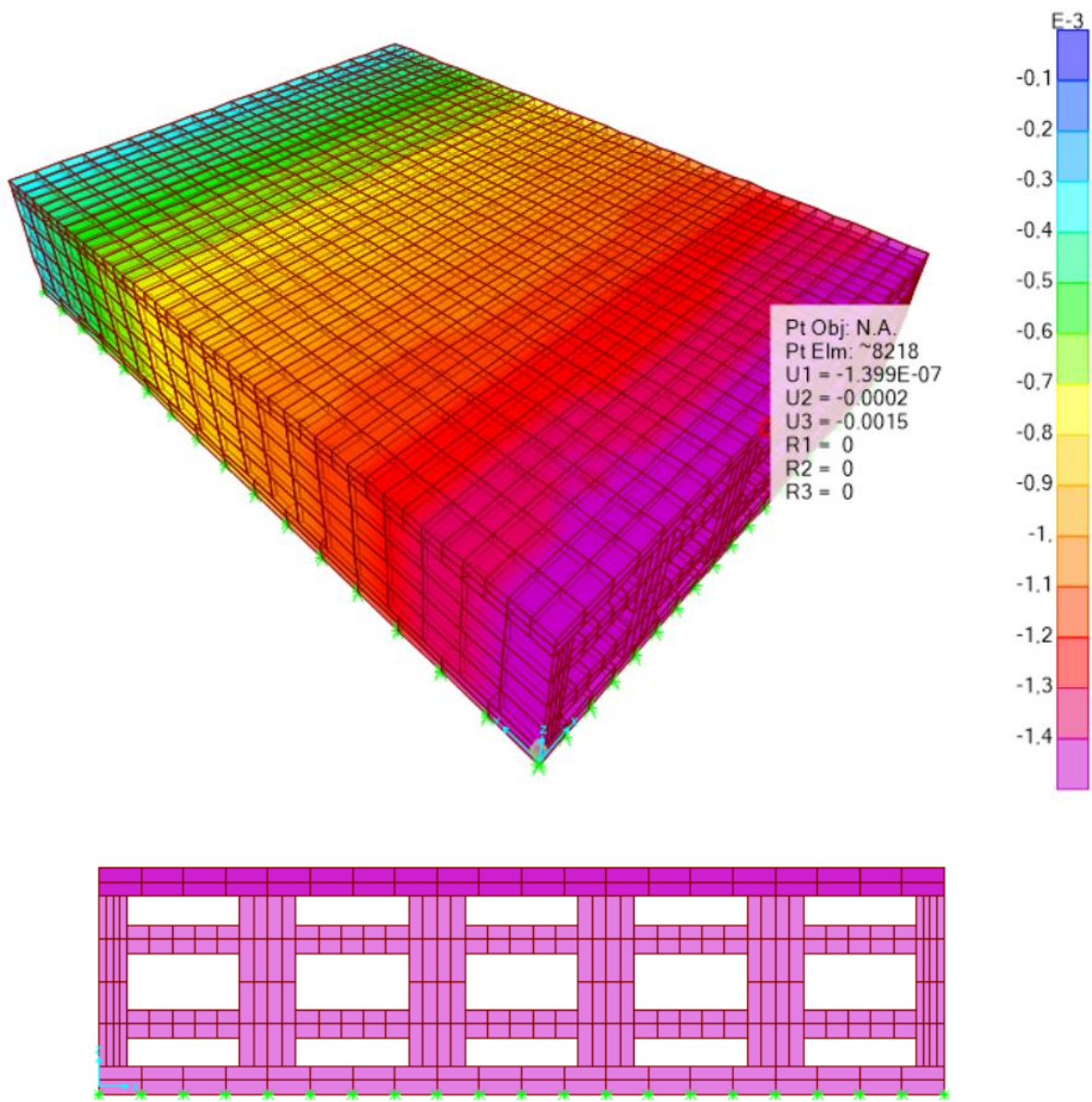


Figura 97. Deformación máxima (mm), diseño 3.

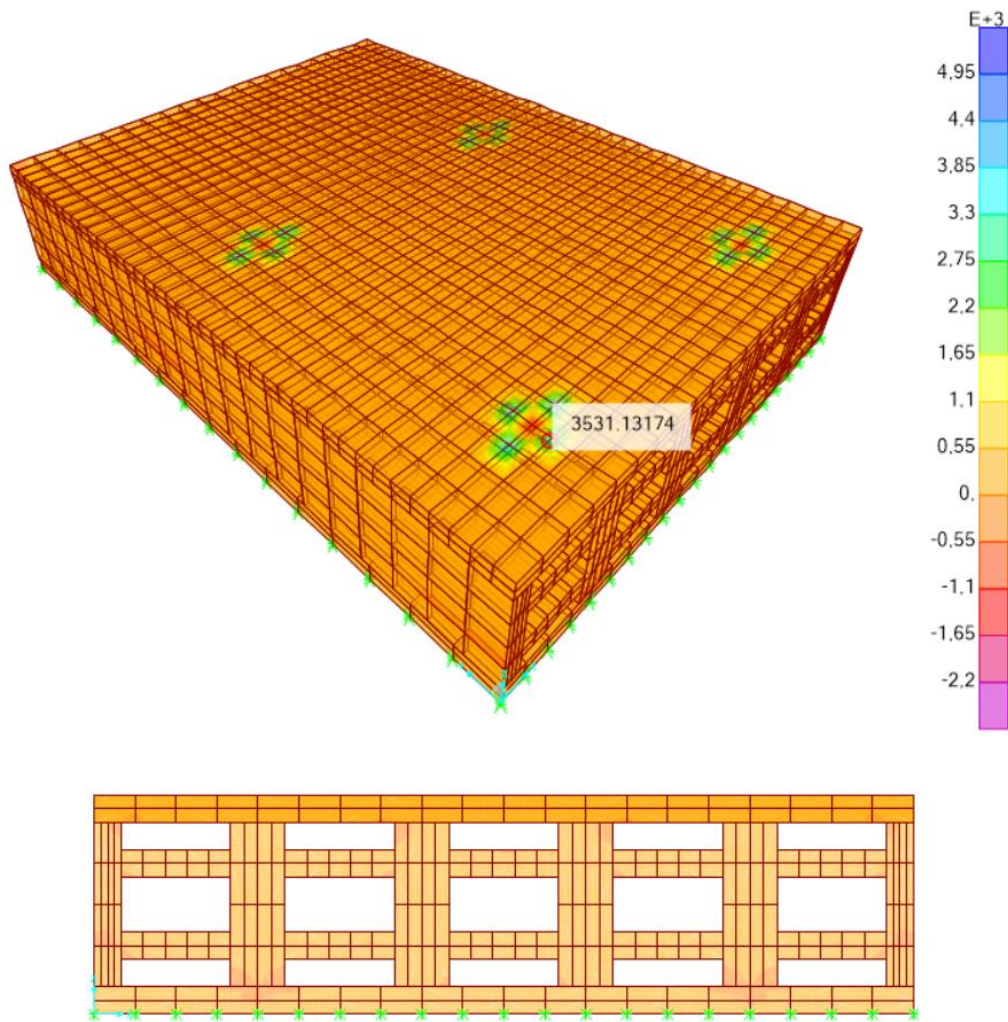


Figura 98. Esfuerzo máximo (kN/m²), diseño 3.

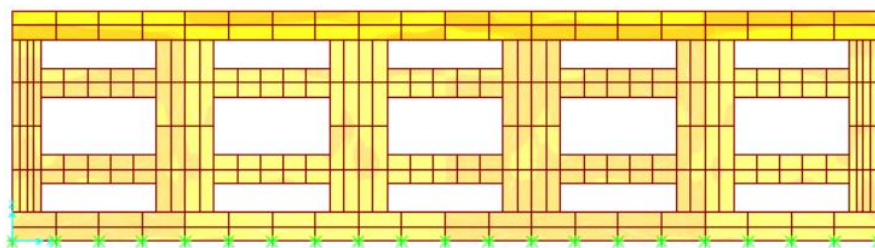
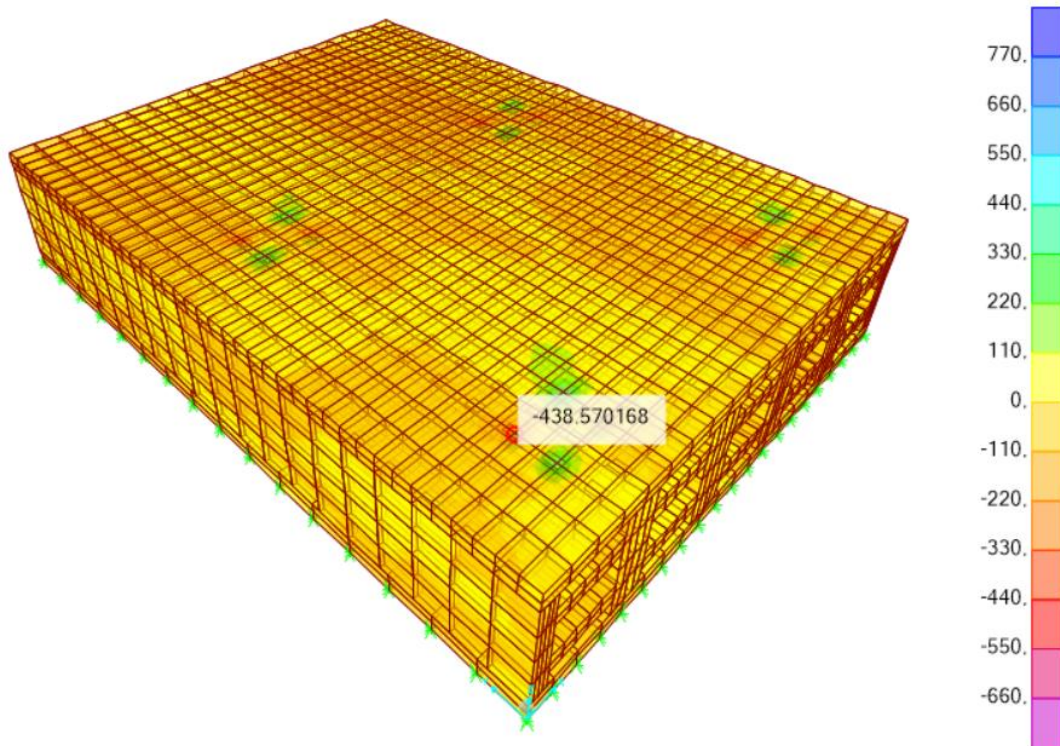


Figura 99. Esfuerzo cortante máximo S_{12} (kN/m^2), diseño 3.

5.8.4.5 Diseño 4

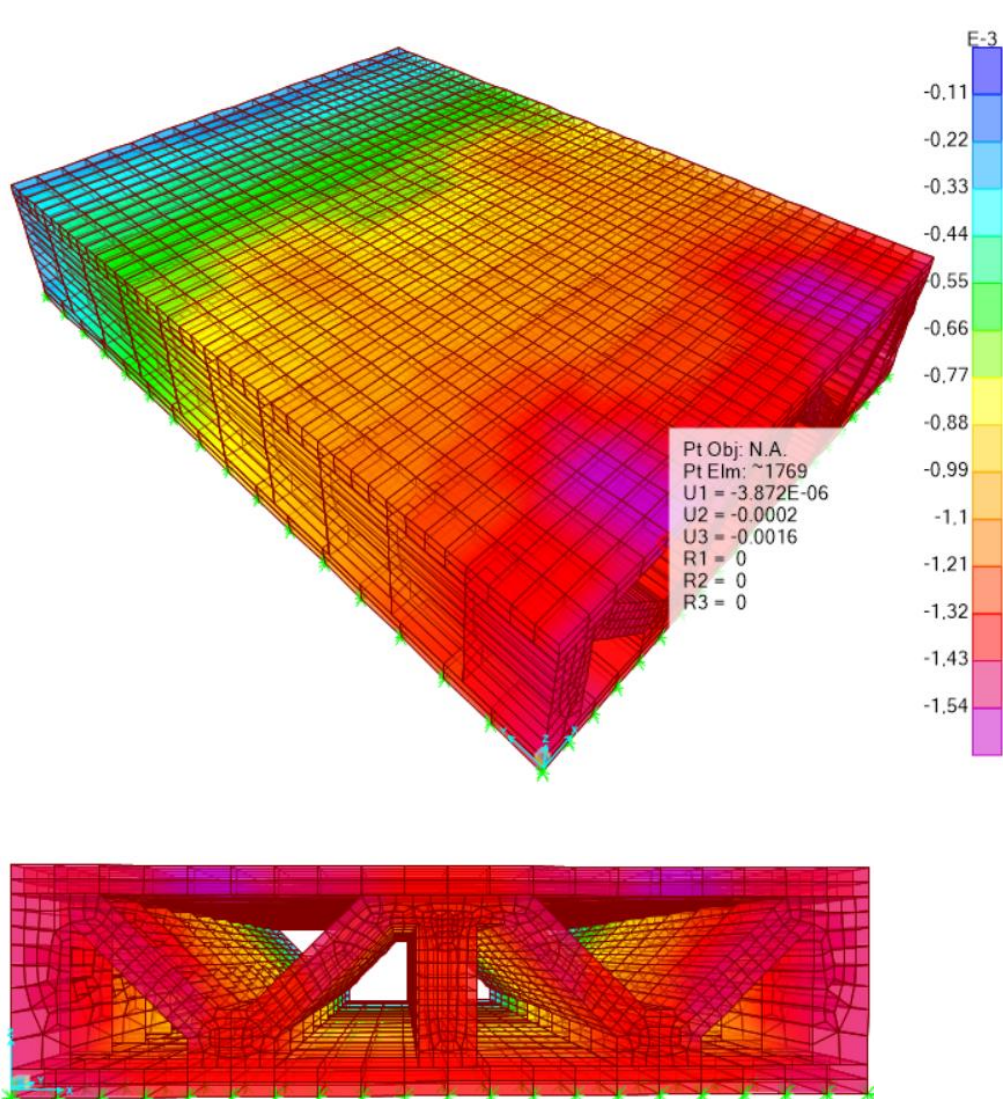


Figura 100. Deformación máxima (mm), diseño 4.

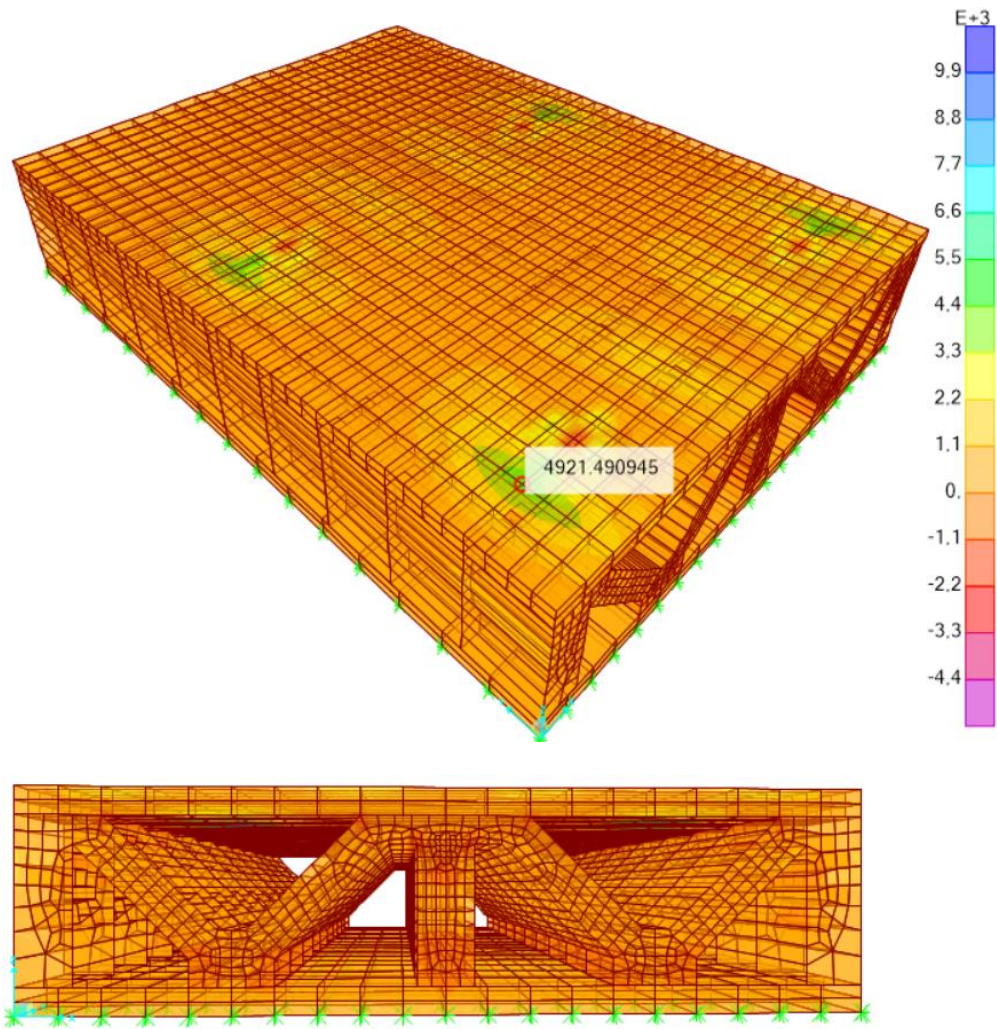


Figura 101. Esfuerzo máximo (kN/m²), diseño 4.

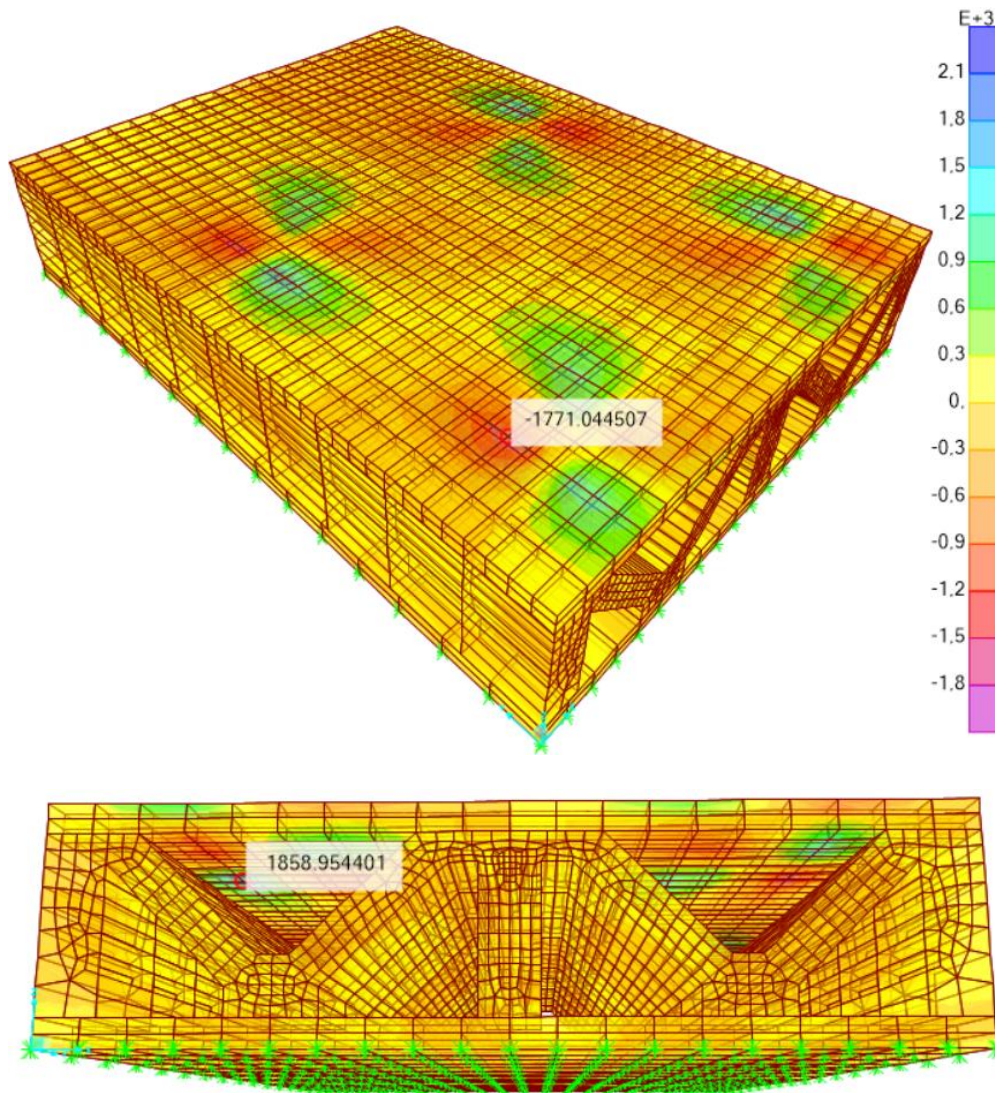
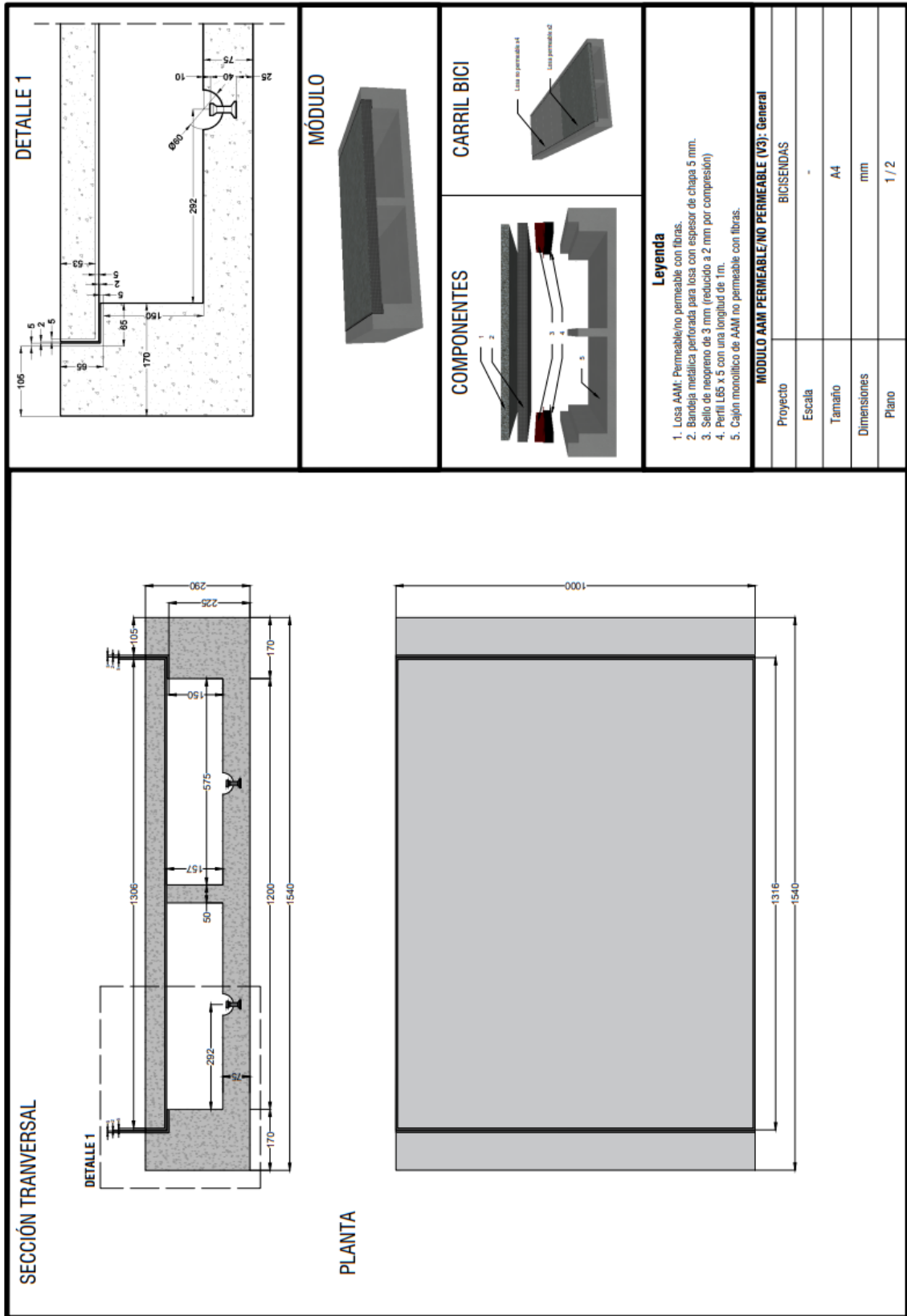


Figura 102. Esfuerzo cortante S_{12} (kN/m^2), diseño 4.

5.8.5 Anejo 14.Plano final de modulo.



5.8.6 Anejo 15. Elementos de elevación

El enganche de las losas, se podrá realizar con una grúa autopropulsada con amarres de cadenas y colocando el conjunto cercha-pinzas de elevación sobre el elemento como se muestra en la Figura 88.

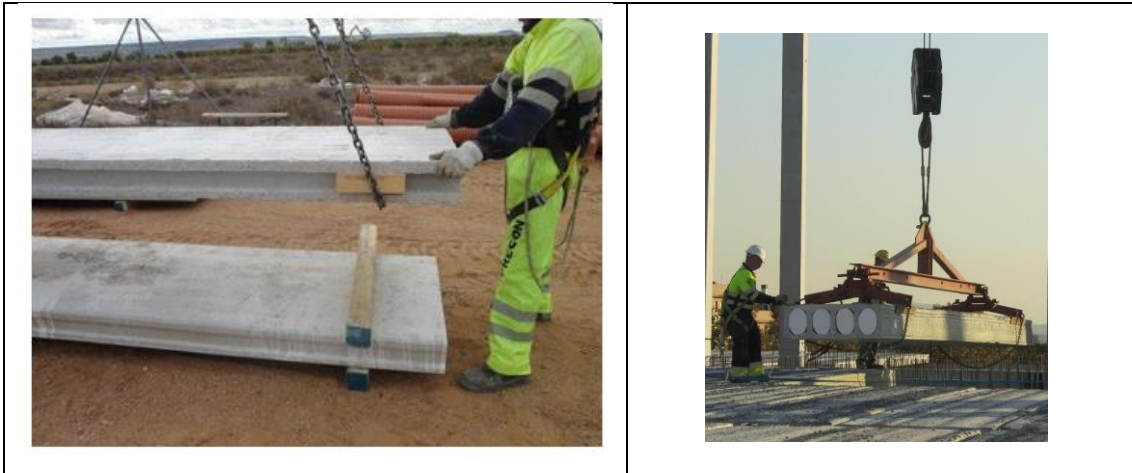


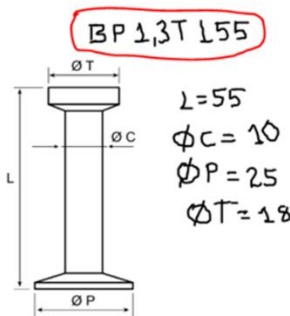
Figura 103. Métodos de colocación de prefabricados tipo losa en obra.

Cuando se encuentran los elementos en el lugar de ubicación final, se retira la cadena de seguridad y se lleva a su sitio definitivo con la ayuda de una “palanqueta”, evitando situar las manos en zonas de peligro.

En el caso de emplear anclajes de elevación en los elementos se debe verificar que las posiciones no perjudiquen estructuralmente las piezas prefabricadas[113].

5.8.7 Anejo 16. Anclajes comerciales

Bulón con pie BP. Foot Anchor BP.

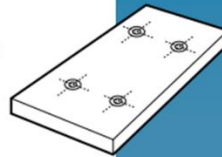


Ref.	1,3 T	2,5 T	5 T	7,5 T	10 T	15 T	20 T	32 T
Ref.	BP013...	BP025...	BP050...	BP075...	BP100...	BP150...	BP200...	BP320...
ØT (mm)	18	25	36	46	46	69	69	88
ØC (mm)	10	14	20	24	28	34	38	50
ØP (mm)	25	35	50	60	70	85	98	135
	40	45	75	100	115	140	200	280
	50	55	85	120	135	165	240	320
	55	65	95	140	150	200	250	500
	65	75	120	160	170	300	340	700
	85	85	180	200	200	400	500	
L (mm)	120	120	240	240	250			
	170	140	340	300	340			
	240	170						
		210						
		240						
		280						

Datos de carga para LOSAS

Posición de los anclajes.

Dirección Longitudinal: distancia al borde el 20% de la longitud.
 Dirección Transversal: distancia al borde el 30% de la anchura.
 La distancia al borde debe ser siempre más de 3 veces la longitud de empotramiento (*)



SLABS lifting load data

Position of the anchors

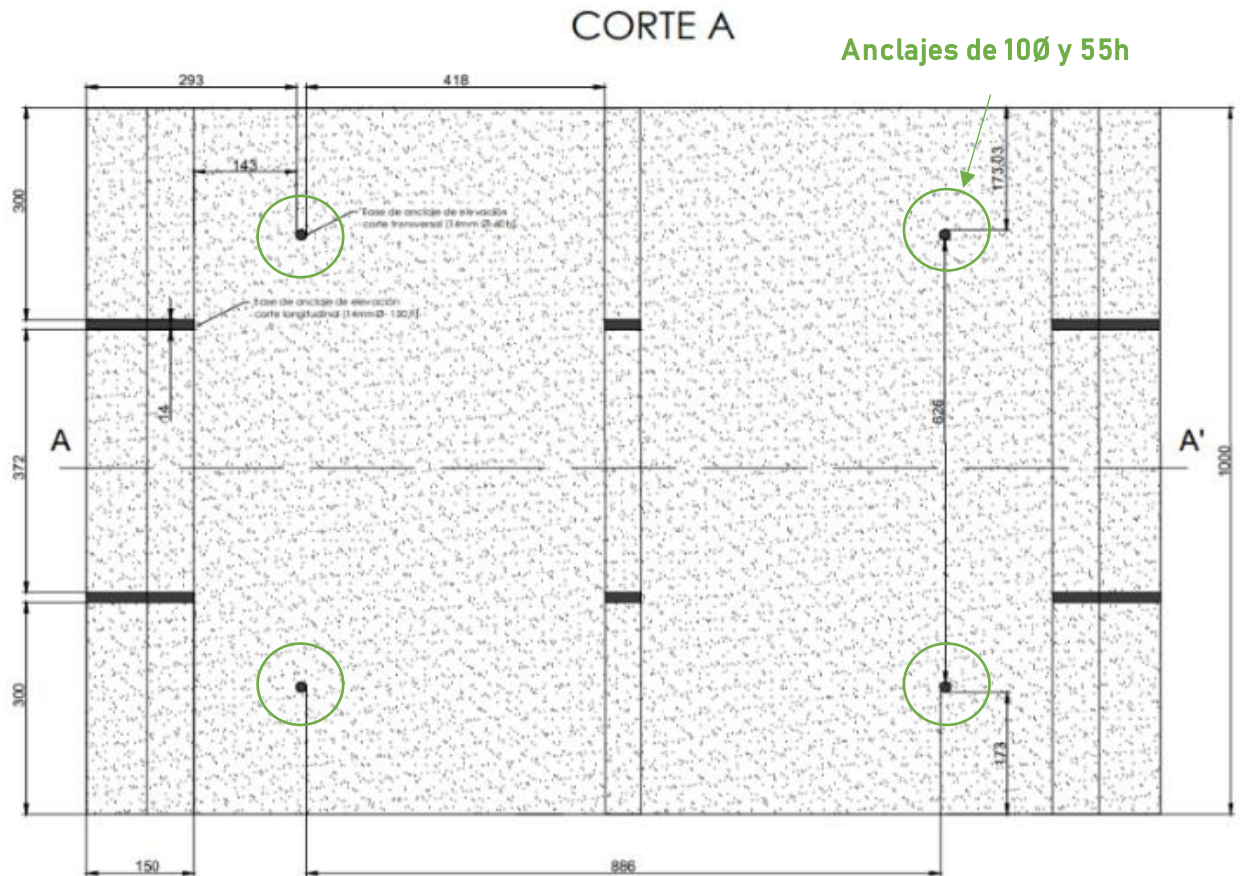
Length direction: edge distance 20% of the length.
 Transverse direction: edge distance 30% of the width.
 The edge distance is always more than 3 x time the built in depth (*)

Foot anchor Bulón kN-L	Built in depth Empotramiento mm	Minimum slab thickness Espesor mínimo de la losa mm	Concrete strength at first load Resistencia del hormigón a la primera carga kN			
			10 N/mm ²	15 N/mm ²	20 N/mm ²	25 N/mm ²
013-065	73	85	9,9	13,0	13,0	13,0
013-085	93	105	>13,0	>13,0	>13,0	>13,0
013-120	128	140	>13,0	>13,0	>13,0	>13,0
025-085	93	105	17,1	22,4	>25,0	>25,0
025-120	131	140	>25,0	>25,0	>25,0	>25,0
025-170	181	190	>25,0	>25,0	>25,0	>25,0
050-120	115	145	24,5	32,2	39,0	45,3
050-180	195	205	>50,0	>50,0	>50,0	>50,0
050-240	255	265	>50,0	>50,0	>50,0	>50,0
075-150	165	175	50,5	66,3	>75,0	>75,0
075-300	315	325	>75,0	>75,0	>75,0	>75,0
100-170	185	195	63,5	83,3	>100,0	>100,0
100-340	355	365	233,9		>100,0	>100,0
(*) For heavy foot-anchors a minimum edge distance of 500 mm is applicable / Para Anclajes de pie pesados es aplicable la distancia mínima de 500 mm						
150-300	316	325	100,6	132,0	>150,0	>150,0
150-400	416	425	111,3	146,0	>150,0	>150,0
200-340	356	365	105,9	138,9	168,4	195,6
200-500	516	525	116,6	153,1	185,6	>200,0
320-0700	727	735	121,8	159,8	193,8	225,0
320-1200	1227	1235	125,3	164,4	199,3	231,5

Las Losas deben estar diseñadas para su transporte.

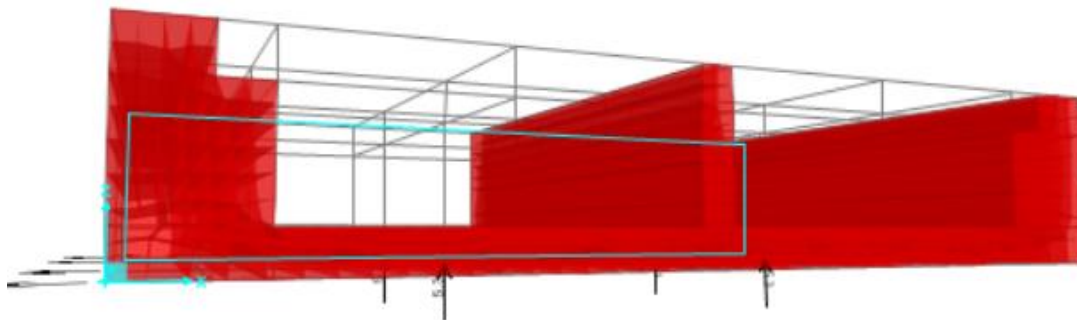
5.8.8 Anejo 17. Anclajes opcionales del módulo.

Distancia de anclajes	mm	Criterio
Eje x	472	30% (1540 mm)
Eje y	200	20% (1000 mm)



Masa del cajón: 2161,3 kg

Fuerza equivalente/ 4 anclajes: 5,3 kN



6 CONCLUSIONES FINALES

Luego de los procedimientos experimentales y los análisis realizados en las tres fases se puede concluir lo siguiente:

En España se identifican cinco subproductos con un potencial significativo como precursores de Materiales Activados Alcalinamente (MAA). Estos subproductos incluyen escorias de acero, residuos de vidrio, residuos de catalizador de craqueo catalítico y diversos materiales cerámicos. Entre ellos, las escorias de acero, los residuos de vidrio de contenedor (fracción no reciclable) y los residuos cerámicos (RDCs) son considerados los más viables debido a sus volúmenes, condiciones de acondicionamiento y características tecnológicas. Estos subproductos exhiben propiedades típicas de precursores, como alto contenido de calcio, bajo contenido de calcio y propiedades híbridas, respectivamente, y presentan contenido suficiente de material amorfo.

Se encontraron diversas condiciones de activación para los diferentes subproductos. Por ejemplo, el curado térmico prolongado favorece el desarrollo de resistencia en los precursores cerámicos, pero perjudica a los precursores de vidrio. Se observó también que la finura del material tiene un impacto significativo en la resistencia final.

Bajo las condiciones de estudio, se encontró que las muestras de vidrio de contenedor presentaron el mejor comportamiento, seguidas por las muestras de Testillo cocido y ladrillo rojo. Por otro lado, la muestra de lodo de vidrio presentó un desempeño inferior y mayor retracción. En términos de resistencia, los precursores de vidrio en matriz de hormigón superaron los 25 MPa a los 48 días, mientras que los precursores cerámicos desarrollaron resistencias inferiores, pero más rápidamente (entre 28 y 48 días).

Para cumplir con las normativas vigentes en la fabricación de módulos prefabricados, se establecieron ciertos límites tanto para el material como para la estructura. El precursor debe poseer una superficie específica mínima de 275 m²/kg, y los esfuerzos mínimos resistentes deben cumplir con el criterio de deformación mínima L/750, además de asegurar una resistencia a la flexión que cubra un factor de seguridad mínimo de 1,35. Sin embargo, las normativas actuales no permiten el empleo de un material distinto al cemento como cementante principal.

A pesar de las limitaciones mencionadas, se logró obtener un MAA con una resistencia a la compresión de 41 MPa y a la flexión de 6,4 MPa, cumpliendo con el factor de seguridad mínimo y las solicitaciones estructurales establecidas. Las piezas fabricadas podrían ser empleadas en 14 de los 18 ambientes de exposición contemplados en el código estructural. Se plantea como última alternativa la mezcla de un 30% de fracción no reciclable de vidrio con un 70% de Testillo, logrando un material con una resistencia a compresión superior a 40 MPa.

En conclusión, la fracción de vidrio no reciclable se presenta como un precursor adecuado para los Materiales Activados Alcalinamente (MAA), cumpliendo con los requisitos de comportamiento mecánico para su uso en prefabricados. Sin embargo, la normativa actual limita su empleo como cementante. A pesar de ello, el MAA obtenido ofrece la posibilidad de aprovechar subproductos y reducir en un 90% el uso de cemento, siendo posible lograr una reducción aún mayor al combinar el precursor con residuos de materiales cerámicos.

6.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ö. Çimen, Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review, *J. Clean. Prod.* 305 (2021) 127180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127180>.
- [2] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinament, 2017. www.ricuc.cl.
- [3] Y. Liu, C. Shi, Z. Zhang, N. Li, An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials, *Resour. Conserv. Recycl.* 144 (2019) 297–309. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.02.007>.
- [4] A.G. De La Torre, S. Bruque, M.A.G. Aranda, Rietveld quantitative amorphous content analysis, *J. Appl. Crystallogr.* 34 (2001) 196–202. <https://doi.org/10.1107/S0021889801002485>.
- [5] D. Braja, *Annual Reports on NMR Spectroscopy*, 2012.
- [6] X. Gao, Q.L. Yu, H.J.H. Brouwers, Apply ^{29}Si , ^{27}Al MAS NMR and selective dissolution in identifying the reaction degree of alkali activated slag-fly ash composites, *Ceram. Int.* 43 (2017) 12408–12419. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.108>.
- [7] Y. Jiang, T.-C. Ling, C. Shi, S.-Y. Pan, Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete-A review, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>.
- [8] K. Otegui Aldai, Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/18344> (accessed May 13, 2019).
- [9] W.-C. Wang, H.-Y. Wang, H.-C. Tsai, Study on engineering properties of alkali-activated ladle furnace slag geopolymer, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.068>.
- [10] M. Chiara Bignozzi, S. Manzi, I. Lancellotti, E. Kamseu, L. Barbieri, C. Leonelli, Mix-design and characterization of alkali activated materials based on

- metakaolin and ladle slag, *Appl. Clay Sci.* 73 (2013) 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.015>.
- [11] P. Lopez Gonzalez L, R.M. Novais, J.A. Labrincha, B. Blanpain, Y. Pontikes, Modifications of basic-oxygen-furnace slag microstructure and their effect on the rheology and the strength of alkali-activated binders, *Cem. Concr. Compos.* 97 (2019) 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.013>.
- [12] Y. Wang, P. Suraneni, Experimental methods to determine the feasibility of steel slags as supplementary cementitious materials, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.196>.
- [13] T.-H. Lu, Y.-L. Chen, P.-H. Shih, J.-E. Chang, Use of basic oxygen furnace slag fines in the production of cementitious mortars and the effects on mortar expansion, *Constr. Build. Mater.* 167 (2018) 768–774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.102>.
- [14] T. Zhang, Q. Yu, J. Wei, J. Li, P. Zhang, Preparation of high performance blended cements and reclamation of iron concentrate from basic oxygen furnace steel slag, *J. Hazard. Mater.* 159 (2008) 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.056>.
- [15] K. Gijbels, R. Ion Iacobescu, Y. Pontikes, S. Schreurs, W. Schroyers, Alkali-activated binders based on ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.194>.
- [16] I. Alp, H. Deveci, H. Süngün, Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production, *J. Hazard. Mater.* 159 (2008) 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.056>.
- [17] J. Singh, S.P. Singh, Development of Alkali-activated Cementitious Material using Copper Slag, *Constr. Build. Mater.* 211 (2019) 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.233>.
- [18] S. Ahmari, K. Parameswaran, L. Zhang, Alkali Activation of Copper Mine Tailings and Low-Calcium Flash-Furnace Copper Smelter Slag, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (2015) 04014193. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001159](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001159).
- [19] A. Nazer, J. Pay, M. Victoria Borrachero, J. Monz, Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.024>.

- [20] A.M. Kalinkin, S. Kumar, B.I. Gurevich, T.C. Alex, E. V Kalinkina, V. V Tyukavkina, V.T. Kalinnikov, R. Kumar, Geopolymerization behavior of Cu-Ni slag mechanically activated in air and in CO₂ atmosphere, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.05.001>.
- [21] L. Reig, M.M. Tashima, M. V Borrachero, J. Monzó, C.R. Cheeseman, J. Payá, Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste, *Constr. Build. Mater.* 43 (2013) 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031>.
- [22] R. Andrés Robayo-Salazar, J. Fernando Rivera, R. Mejía de Gutiérrez, Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.122>.
- [23] K. Komnitsas, D. Zaharaki, A. Vlachou, G. Bartzas, M. Galetakis, Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers, *Adv. Powder Technol.* 26 (2015) 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.11.012>.
- [24] C. Lum Wong, K.H. Mo, S.P. Yap, U.J. Alengaram, T.-C. Ling, Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193>.
- [25] F. Puertas, A. Barba, M.F. Gazulla, M.P. Gómez, M. Palacios, S. Martínez-Ramírez, S. Martínez-Ramírez, Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento Portland: caracterización y activación alcalina, *Mater. Construcción.* 56 (2006) 73–84. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i281.94>.
- [26] J. Fo, E. Vejmelkov, D. Ko, N. Alblov, M.C. Achov, M. Keppert, P. Rovnaníkov, R. Cerný, Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: Functional and environmental aspects, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.181>.
- [27] E.D. Rodríguez, S.A. Bernal, J.L. Provis, J.D. Gehman, J.M. Monzó, J. Payá, M.V. Borrachero, Geopolymers based on spent catalyst residue from a fluid catalytic cracking (FCC) process, *Fuel.* 109 (2013) 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.053>.

- [28] J. Payá, J. Monzo, M. V Borrachero, P. Albino Garces, J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, P. Garcés, A. Mellado, S. Velázquez, L. Soriano, E. Zornoza, Outstanding aspects on the use of spent fcc catalyst in binders, in: 1st Spanish Natl. Conf. Adv. Mater. Recycl. Eco - Energy , Madrid, 2009. <https://www.researchgate.net/publication/267821035> (accessed June 12, 2019).
- [29] M.M. Tashima, J.L. Akasaki, V.N. Castaldelli, L. Soriano, J. Monzó, J. Payá, M. V Borrachero, New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC), (2012). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.051>.
- [30] M.M. Tashima, J.L. Akasaki, J.L.P. Melges, L. Soriano, J. Monzó, J. Payá, M. V Borrachero, Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): Influence of $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ and $\text{H}_2\text{O}/\text{FCC}$ ratio on mechanical strength and microstructure, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.052>.
- [31] C. Martínez López, J.M. Mejía Arcila, J. Torres Agredo, R. Mejía de Gutiérrez, Evaluation of the toxicity characteristics of two industrial wastes valorized by geopolymerization process, DYNA. 82 (2015) 74–81. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.43136>.
- [32] M.A. Mas, M.M. Tashima, J. Payá, M.V. Borrachero, L. Soriano, J.M. Monzó, A Binder from Alkali Activation of FCC Waste: Use in Roof Tiles Fabrication, Key Eng. Mater. 668 (2015) 411–418. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.411>.
- [33] C. Costa, M.F. Ribeiro, C. Ferreira, M.F. Ribeiro, A. Fernandes, Alkali-activated binders produced from petrochemical fluid catalytic cracking catalyst waste, IJRET Int. J. Res. Eng. Technol. (2014) 2321–7308. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0325019>.
- [34] J.J. Trochez, R. Mejía de Gutiérrez, J. Rivera, S.A. Bernal, Synthesis of geopolymer from spent FCC: Effect of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar ratios, Mater. Construcción. 65 (2015) e046. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.00814>.
- [35] R. Xiao, B. Huang, H. Zhou, Y. Ma, X. Jiang, A state-of-the-art review of crushed urban waste glass used in OPC and AAMs (geopolymer): Progress and challenges, Clean. Mater. 4 (2022) 100083. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100083>.

- [36] J.F. Rivera, Z.I. Cuarán-Cuarán, N. Vanegas-Bonilla, R. Mejía De Gutiérrez, Novel use of waste glass powder: Production of geopolymeric tiles, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.023>.
- [37] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.071>.
- [38] F. Puertas, M.M. Alonso, Reuse of urban and industrial waste glass as a novel activator for alkali-activated slag cement pastes: a case study, Woodhead Publishing Limited, 2015. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.75>.
- [39] G. Ke, W. Li, R. Li, Y. Li, G. Wang, Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali-Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 12 (2018) 67. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7>.
- [40] M. Vafaei, A. Allahverdi, Durability of Geopolymer Mortar Based on Waste-Glass Powder and Calcium Aluminate Cement in Acid Solutions, (2017). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002053).
- [41] S. Zhang, A. Keulen, K. Arbi, G. Ye, Waste glass as partial mineral precursor in alkali-activated slag/fly ash system, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.012>.
- [42] C. Morrison, R. Hooper, K. Lardner, The use of ferro-silicate slag from ISF zinc production as a sand replacement in concrete, (n.d.). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00234-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00234-5).
- [43] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, ESTADÍSTICA MINERA DE ESPAÑA 2020, (2022) 44-44. <https://energia.gob.es/mineria/Estadistica/DatosBibliotecaConsumer/2020/Estadistica-Minera-Anual-2020.pdf> (accessed September 19, 2022).
- [44] Q. Wu, Y. Wu, W. Tong, H. Ma, Utilization of nickel slag as raw material in the production of Portland cement for road construction, *Constr. Build. Mater.* 193 (2018) 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.109>.
- [45] T.C. Phiri, P. Singh, A.N. Nikoloski, The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review-Part I, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107474>.

- [46] UNESID (Unión de Empresas Siderúrgicas de España), La industria siderúrgica española 2021, Magazine. (2021) 17–17. https://unesid.org/descargas_files/Revista2021.pdf (accessed September 21, 2022).
- [47] UNESID, IECA, Escorias de alto horno CEDEX, Ficha Técnica . (2011) 1–20. <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/BFF81F23-BDB7-4B5B-85A5-A7ABD2974A42/119856/ESCORIASDEHORNOALTO.pdf> (accessed September 12, 2022).
- [48] D. Pan, L. Li, X. Tian, Y. Wu, N. Cheng, H. Yu, A review on lead slag generation, characteristics, and utilization, *Resour. Conserv. Recycl.* 146 (2019) 140–155. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.036>.
- [49] B. Alonso-Fariñas, M. Rodríguez-Galán, C. Arenas, F. Arroyo Torralvo, C. Leiva, Sustainable management of spent fluid catalytic cracking catalyst from a circular economy approach, *Waste Manag.* 110 (2020) 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.046>.
- [50] B.P. Oil, E.S.A.U. Refinería, B.P. Oil, E.S.A.U. Refinería, Declaración Medioambiental BP Oil Castellón 2021, (2021). https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/es_es/spain/home/pdfs/comunidad/declaracion_medioambiental_2021.pdf.
- [51] M. Gracias, Declaración medioambiental CEPSA Rabida 2020, 18 (2008) 1–50. https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/documents/20151/4076239/003_dma.pdf/205f983f-30b0-2ebc-4da5-2380be4fb5af?t=1626073212747.
- [52] S. V Patil, B.N. Thorat, Mechanical dewatering of red mud, *Sep. Purif. Technol.* 294 (2022) 121157. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121157>.
- [53] Ú. García Gallardo, Estudio normativo sobre el transporte del lodo rojo, Universidad de Sevilla, 2019. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/100204/TFM-1491-GARCIA GALLARDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed October 6, 2022).
- [54] W. Ferdous, A. Manalo, R. Siddique, P. Mendis, Y. Zhuge, H.S. Wong, W. Lokuge, T. Aravinthan, P. Schubel, Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application

- and future opportunities, *Resour. Conserv. Recycl.* 173 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>.
- [55] Junta directiva Ecovidrio, Informe de sostenibilidad 2021, Madrid, 2022. https://www.ecovidrio.es/sites/default/files/2022-07/Informe_Sostenibilidad_Ecovidrio_2021_1.pdf (accessed October 14, 2022).
- [56] L.L. Alberto opez Ruiz, X. Roca Ram on, S. Gass Domingo, The circular economy in the construction and demolition waste sector e A review and an integrative model approach, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>.
- [57] Asociacion española de reciclaje de residuos de construcción y demolición, Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España, 2021. <https://rcdasociacion.es/wp-content/uploads/2021/12/Informe-producción-2020-RCDA.pdf> (accessed September 30, 2022).
- [58] Informa D&B, Directorio de empresas INFORMA, (2019) 1–1. <https://www.informa.es/directorio-empresas/> (accessed September 12, 2022).
- [59] Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP), Industria Petrolífera, Present. Del Seguim. La Ind. Pet. (2020) 1–18. <https://www.aop.es/wp-content/uploads/2018/01/Industria-Petrolifera-FINAL.pdf> (accessed September 12, 2022).
- [60] X. Wang, Z. Luo, L. Zhang, H. Rong, J. Yang, Utilization of red mud as raw material in the production of field road cement, *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 31 (2016) 877–882. <https://doi.org/10.1007/s11595-016-1462-0>.
- [61] Gadea Carrera Enrique, NTP 184: Mercurio. Control ambiental y biológico, NTP 184 Mercur. Control Ambient. y Biológico. (n.d.). https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_184.pdf/36262427-2de4-44c8-9298-1ed2c30a201a?version=1.0&t=1617977284529 (accessed October 17, 2022).
- [62] L. Alcaraz, O. Rodríguez-Largo, M. Alvarez-Montes, F.A. López, C. Baudín, Effect of lanthanum content on physicochemical properties and thermal evolution of spent and beneficiated spent FCC catalysts, *Ceram. Int.* 48 (2022) 17691–17702. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.039>.

- [63] F. Sha, H. Li, D. Pan, H. Liu, X. Zhang, Development of steel slag composite grouts for underground engineering, *J. Mater. Res. Technol.* 9 (2020) 2793–2809. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.01.014>.
- [64] M. Barczewski, A. Hejna, J. Aniśko, J. Andrzejewski, A. Piasecki, O. Mysiukiewicz, M. Bąk, B. Gapiński, Z. Ortega, Rotational molding of polylactide (PLA) composites filled with copper slag as a waste filler from metallurgical industry, *Polym. Test.* 106 (2022) 107449. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2021.107449>.
- [65] L. Yu, Y. Li, T. Liu, Z. Qin, H. Tan, H. Zhang, Z. Chen, H. Ni, Mechanical and microstructural characterization of geopolymers synthesized from FCC waste catalyst and silica fume, *Ceram. Int.* 47 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.080>.
- [66] L. Reig, · M M Tashima, · L Soriano, · M V Borrachero, · J Monzó, · J Payá, Alkaline Activation of Ceramic Waste Materials, 4 (2013) 729–736. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9197-z>.
- [67] M. Cyr, R. Idir, T. Poinot, Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet, *J. Mater. Sci.* 47 (2012) 2782–2797. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6107-2>.
- [68] J.L. Provis, J.S.J. Van Deventer, Alkali Activated Materials : State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM, n.d. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=fvXHBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&ots=k4TS-3MxyM&sig=ZLGQf3pCPB-AdEm-v7p5dR6dDgw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed May 8, 2019).
- [69] A. Nazer, J. Payá, M.V. Borrachero, J. Monzó, Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices, *J. Environ. Manage.* 167 (2016) 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.024>.
- [70] M.M. Tashima, L. Soriano, J. Monzó, M. V Borrachero, J.L. Akasaki, J. Payá, New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions, 64 (2014) 32. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00914>.
- [71] T. Munhoz, N. Karpukhina, R.G. Hill, R. V. Law, L.H. De Almeida, Setting of commercial glass ionomer cement Fuji IX by 27Al and 19F MAS-NMR, *J. Dent.* 38

- (2010) 325–330. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2009.12.005>.
- [72] A.M.B. Silva, C.M. Queiroz, S. Agathopoulos, R.N. Correia, M.H.V. Fernandes, J.M. Oliveira, Structure of SiO₂-MgO-Na₂O glasses by FTIR, Raman and ²⁹Si MAS NMR, *J. Mol. Struct.* 986 (2011) 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.11.023>.
- [73] M. Edén, ²⁷Al NMR Studies of Aluminosilicate Glasses, *Annu. Reports NMR Spectrosc.* 86 (2015) 237–331. <https://doi.org/10.1016/bs.arnmr.2015.04.004>.
- [74] A. Maldonado-Alameda, J. Giro-Paloma, A. Svobodova-Sedlackova, J. Formosa, J.M. Chimenos, Municipal solid waste incineration bottom ash as alkali-activated cement precursor depending on particle size, *J. Clean. Prod.* 242 (2020) 118443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118443>.
- [75] R.A. Robayo-Salazar, J.F. Rivera, R. Mejía de Gutiérrez, Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.122>.
- [76] M.M. Tashima, J.L. Akasaki, V.N. Castaldelli, L. Soriano, J. Monzó, J. Payá, M. V Borrachero, New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC), *Mater. Lett.* 80 (2012) 50–52. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.051>.
- [77] C.L. Hwang, M. Damtie Yehualaw, D.H. Vo, T.P. Huynh, Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders, *Constr. Build. Mater.* 218 (2019) 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.143>.
- [78] C. Ruiz-Santaquiteria, A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Alternative prime materials for developing new cements: Alkaline activation of alkali aluminosilicate glasses, *Ceram. Int.* 42 (2016) 9333–9340. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.111>.
- [79] R.M. Novais, G. Ascensão, M.P. Seabra, J.A. Labrincha, Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.003>.
- [80] I. Kourti, D. Amutha Rani, D. Deegan, A.R. Boccaccini, C.R. Cheeseman, Production of geopolymers using glass produced from DC plasma treatment of air pollution control (APC) residues, *J. Hazard. Mater.* 176 (2010) 704–709.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.089>.

- [81] I. Kourti, A.R. Devaraj, A. Guerrero Bustos, D. Deegan, A.R. Boccaccini, C.R. Cheeseman, Geopolymers prepared from DC plasma treated air pollution control (APC) residues glass: Properties and characterisation of the binder phase, *J. Hazard. Mater.* 196 (2011) 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.081>.
- [82] B. Marchand, S. Lanier, C.A. Davy, C. Albert-Mercier, G. Tricot, Are calcium silicate hydrates (C-S-H) present in alkali-activated glass cullet cement?, *Mater. Lett.* 219 (2018) 104–108. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.02.046>.
- [83] N.J. Clayden, S. Esposito, A. Aronne, P. Pernice, Solid state ^{27}Al NMR and FTIR study of lanthanum aluminosilicate glasses, *J. Non. Cryst. Solids.* 258 (1999) 11–19. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(99\)00555-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(99)00555-4).
- [84] A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, A. Fernández-Jiménez, A review on alkaline activation: new analytical perspectives, *Mater. Construcción.* 64 (2014) 22. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>.
- [85] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure, *Microporous Mesoporous Mater.* 86 (2005) 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.05.057>.
- [86] À. Maldonado-Alameda, J. Giro-Paloma, A. Alfocea-Roig, J. Formosa, J.M. Chimenos, Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Sole Precursor in the Alkali-Activated Binder Formulation, *Appl. Sci.* 10 (2020) 4129. <https://doi.org/10.3390/app10124129>.
- [87] M.T. Carrasco, REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS VÍTREOS URBANOS E INDUSTRIALES EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTOS ALCALINOS. ACTIVACIÓN, COMPORTAMIENTO Y DURABILIDAD, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2015.
- [88] S. Dadsetan, H. Siad, M. Lachemi, M. Sahmaran, Evaluation of the tridymite formation as a technique for enhancing geopolymer binders based on glass waste, *J. Clean. Prod.* 278 (2021) 123983. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123983>.
- [89] A. Adesina, A.R.G. De Azevedo, M. Amin, M. Hadzima-Nyarko, I. Saad Agwa, A.M.

- Zeyad, B.A. Tayeh, Fresh and mechanical properties overview of alkali-activated materials made with glass powder as precursor, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100036>.
- [90] L.N. Alexander KRAUS, Tatiana MITKINA, Frank DIERSCHKE, Maxim PULKIN, US 2016/0369024 A1, US 20160369024A1, 2016. <https://patentimages.storage.googleapis.com/c7/aa/8b/e6e90ccd3d0a66/US20160369024A1.pdf>.
- [91] S. Ibrahim, A. Meawad, Towards green concrete: Study the role of waste glass powder on cement/superplasticizer compatibility, J. Build. Eng. 47 (2022) 103751. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103751>.
- [92] T. Conte, J. Plank, Impact of molecular structure and composition of polycarboxylate comb polymers on the flow properties of alkali-activated slag, Cem. Concr. Res. 116 (2019) 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.014>.
- [93] F. Martini, M. Tonelli, M. Geppi, F. Ridi, S. Borsacchi, L. Calucci, Hydration of MgO/SiO₂ and Portland cement mixtures: A structural investigation of the hydrated phases by means of X-ray diffraction and solid state NMR spectroscopy, Cem. Concr. Res. 102 (2017) 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.029>.
- [94] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders, Woodhead Publishing Limited, 2014. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.19>.
- [95] National Institute of Standards and Technology (NIST), Base de Datos de Referencia Estándar del NIST, (2022). <https://doi.org/10.18434/T4D303>.
- [96] G.K. Sun, J.F. Young, R.J. Kirkpatrick, The role of Al in C-S-H: NMR, XRD, and compositional results for precipitated samples, Cem. Concr. Res. 36 (2006) 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.002>.
- [97] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, Real Decreto 470/2021. Código Estructural., España, 2021. <https://www.boe.es>.
- [98] AENOR, ANDECE, UNE-EN 13369:Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón, España, 2018. www.une.org.

- [99] E. Del, D. Une, UNE 127050: Norma Española Sistemas constructivos industrializados para edificios construidos a partir de elementos prefabricados de hormigón Requisitos de comportamiento , fabricación , instalación, España, 2021. www.une.org.
- [100] AENOR AEN/CTN 83; ANENEFHOP, UNE-EN-13670: Ejecución de estructuras de hormigón, España, 2013. www.une.org.
- [101] AENOR CTN 127; ANDECE, UNE-EN 16757: Declaraciones ambientales de producto. Reglas de Categoría de Producto para hormigón y elementos de hormigón, 2023.
- [102] AENOR, UNE-EN-197-1 Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, 2011. <https://portal-aenormas-aenor-com.recursos.biblioteca.upc.edu/aenor/visor.asp?pidnorma=087057057061065063059060-635248546&pidioma=ES&pidtipo=N#page=1> (accessed May 22, 2019).
- [103] AENOR, UNE-EN 15167-2:2008 Escorias granuladas molidas de horno alto, 2028. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0040738> (accessed May 19, 2023).
- [104] J. Kano, F. Saito, Correlation of powder characteristics of talc during planetary ball milling with the impact energy of the balls simulated by the particle element method, *Powder Technol.* 98 (1998) 166–170. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(98\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00039-4).
- [105] L.E. Menchaca-Ballinas, A. V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, Waste glass as a precursor in sustainable hydraulic cements activated with CaO-NaOH-Na₂CO₃, *Constr. Build. Mater.* 302 (2021) 124099. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124099>.
- [106] G. Editors, J. Shiun Lim, W. Shin Ho, J.J. Klemeš, G. Fahim Huseien, M. Ismail, M. Tahir, J. Mirza, A. Hussein, N. Hafiza Khalid, N. Nabilah Sarbini, J. Bahru, Performance of Sustainable Alkali Activated Mortars Containing Solid Waste Ceramic Powder, *Chem. Eng. Trans.* 63 (2018). <https://doi.org/10.3303/CET1863113>.
- [107] N. Cristelo, L. Segadães, J. Coelho, B. Chaves, N.R. Sousa, Recycling municipal solid waste incineration slag and fly ash as precursors in low-range alkaline cements, (n.d.). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.013>.

- [108] G. Abood Habeeb, H. Bin Mahmud, Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement Material, *Mater. Res.* 13 (2010) 185–190.
- [109] J. Mellmann, The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior, *Powder Technol.* 118 (2001) 251–270. www.elsevier.com/locate/powtec (accessed May 14, 2023).
- [110] A. Gupta, D.S. Yan, Tubular Ball Mills, 2006. <https://doi.org/10.1016/b978-044451636-7/50008-5>.
- [111] F.K. Mulenga, N. Chimwani, Introduction to the use of the attainable region method in determining the optimal residence time of a ball mill, *Int. J. Miner. Process.* 125 (2013) 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.09.007>.
- [112] M. Giraud, C. Gatumel, S. Vaudez, J. Nos, T. Gervais, G. Bernard-Granger, H. Berthiaux, Investigating grinding mechanisms and scaling criteria in a ball mill by dimensional analysis, *Adv. Powder Technol.* 32 (2021) 2988–3001. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.06.016>.
- [113] ANDECE, Guia Tecnica de forjados prefabricados de hormigón, 2022. <https://www.andece.org/wp-content/uploads/2022/08/Guia-Tecnica-Forjados-prefabricados-de-hormigon.-V3.pdf>.