

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
EDIFICACIÓN SOSTENIBLE

POSIBILIDADES DE USO DEL FILLER DE RECUPERACIÓN Y ÁRIDO RECICLADO EN GROUTS DE RELLENO DE BLOQUES DE HORMIGÓN

Trabajo Fin de Máster - Septiembre 2019
Curso 2018-2019

ADONAY PINTO PÉREZ

Tutoras:

Gumersinda Seara Paz
Belén González Fonteboa

E. U. ARQUITECTURA TÉCNICA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Este proyecto se enmarca dentro del proyecto de investigación *ALFILLER*:

“Valorización del filler de recuperación de plantas asfálticas para el desarrollo de eco-productos de base cemento”.

El proyecto *ALFILLER* está enmarcado en el programa CONECTAPEME 2018, que cuenta con financiación de la Xunta de Galicia por medio de la Axencia Galega de Innovación (GAIN) y el apoyo de la Consellería de Economía, Emprego e Industria y está cofinanciado a cargo de fondos FEDER.

En el proyecto participan las empresas EXTRACO Construcciones e Proxectos S.A., PREFHORVISA, GALAICONTROL S.L. y RENGA S.L. junto con el Grupo de Construcción gCons de la Universidade da Coruña.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer el trabajo y esfuerzo realizado por parte de mis tutoras Belén y Sindy, sin el cual este proyecto no se habría podido realizar. Tanto en el laboratorio como en las reuniones, aunque se mantenía la rigurosidad necesaria de un trabajo de investigación, siempre había un ambiente agradable y distendido, que hacía el trabajo mucho más ameno.

Agradecer a Yordi, María y Eva, mis compañeros de laboratorio, el trato y la ayuda recibida. Desde el primer día me hicieron sentir como uno más, haciendo siempre bromas y el tonto, pero a la vez preocupándose de que aprendiese y avanzase en mi proyecto. Es cierto que la carga de trabajo en el laboratorio es mayor de lo que aparenta desde fuera, pero con ellos allí es prácticamente imposible no pasárselo bien.

Agradecer al resto de miembros del grupo gCons por su apoyo a la hora de buscar información, preparar ensayos, manejo de maquinaria etc. a Débora de la biblioteca de la EUAT, por estar siempre disponible para solucionar cualquier duda bibliográfica que me pudiera surgir, a toda la promoción del MUES18-19 por la ayuda prestada y, en general, a toda la universidad y empresas participantes en *Alfiller*, por darme la oportunidad de realizar un proyecto de investigación real, no meramente académico.

Por último, dar las gracias a mi familia, a Pili y a mis amigos por los ánimos recibido durante estos últimos meses, que, aun viéndonos poco, han sabido estar ahí apoyándome y no mandándome de paseo por estar tan desaparecido. A todos, muchas gracias.

RESUMEN

Según la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), en 2018 se produjeron en España 16,1 millones de toneladas de mezclas asfálticas en caliente, lo que corresponde a una generación de 644.000 toneladas de filler de recuperación. Este residuo es parcialmente aprovechado por la propia industria, pero en un porcentaje reducido del 3-4%, siendo el resto enviado a vertedero.

Este proyecto se centra en la búsqueda de un nuevo uso a dicho residuo, incorporándolo como sustituto del filler comercial en grouts de relleno de bloques de hormigón y analizando su comportamiento junto con otro residuo, el árido reciclado.

Se diseñó un programa experimental dividido en dos fases: la primera dedicada a la creación y prueba, tanto en estado fresco como en endurecido, de grouts con distintos porcentajes de filler de recuperación y presencia o no de árido reciclado. En la segunda fase, se introdujeron el grout de control y el grout con mayor cantidad de residuos, en bloques de hormigón convencionales, y bloques con una sustitución del 100% del árido por ceniza de fondo de carbón para analizar su comportamiento.

Los resultados obtenidos muestran que, aun produciendo un descenso de las resistencias y trabajabilidad en el grout, la incorporación del filler de recuperación con árido reciclado mejora el comportamiento del conjunto de bloque más grout frente a esfuerzos de compresión, elevando las resistencias de estos.

PALABRAS CLAVE

Filler de recuperación; Grout; Bloques de hormigón; Árido reciclado

RESUMO

Segundo a Asociación Española de Fabricantes de Mesturas Asfálticas (ASEFMA), en 2018 producíronse en España 16,1 millóns de toneladas de mesturas asfálticas en quente, o que corresponde a unha xeración de 644.000 toneladas de filler de recuperación. Este residuo é parcialmente aproveitado pola propia industria, pero nunha porcentaxe reducida do 3-4%, sendo o resto enviado a vertedeiro.

Este proxecto céntrase na procura dun novo uso ao filler de recuperación, incorporándoo como substituto do filler comercial en grouts de recheo de bloques de formigón e analizando o seu comportamento xunto con outro residuo, o árido reciclado.

Deseñouse un programa experimental dividido en dúas fases: a primeira dedicada á creación e proba, tanto en estado en fresco como en endurecido, de grouts con distintas porcentaxes de filler de recuperación e presenza ou non de árido reciclado. Na segunda fase, introducíronse o grout de control e o grout con maior cantidade de residuos, en bloques de formigón convencionais, e bloques cunha substitución do 100% do árido por cinza de fondo de carbón para analizar o seu comportamento.

Os resultados obtidos mostran que, aínda producindo un descenso das resistencias e traballabilidade no grout, a incorporación do filler de recuperación con árido reciclado mellora o comportamento do conxunto de bloque máis grout fronte a esforzos de compresión, elevando as resistencias destes.

PALABRAS CHAVE

Filler de recuperación; Grout; Bloque de formigón; Árido reciclado

ABSTRACT

According to the Spanish association of manufacturers of asphalt mixtures (ASEFMA), in 2018 16,1 million tons of hot asphalt mixtures were produced in Spain, which corresponds to a generation of 644,000 tons of recovery filler. This waste is used by the industry itself, but in low percentages between 3 and 4%, the rest is sent to landfills.

This project focuses on searching for a new application for this waste, incorporating it into masonry grouts as a substitute for the commercial filler, and analyzing its behavior with another waste, the recycled aggregates.

An experimental program was designed, divided into two phases. The first one created with the purpose of testing different grouts with different percentage of recovery filler and recycled aggregates. The second one, the grout used as control in phase one, and the grout with the largest amount of wastes was used to fill two types of concrete blocks: conventional ones, and blocks made with bottom coal ash instead of fine aggregates.

The results show that, even though the compressive strength of the grout decreases with the addition of the recovery filler and the recycled aggregate, the combination between the two materials acts homogeneously and got higher compressive strength than the control ones.

KEY WORDS

Recovery filler; Grout; Concrete block; Recycled aggregates

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Introducción	15
1.2. Contenido del documento	16
2. ESTADO DEL ARTE.....	21
2.1. Introducción	21
2.2. Hormigones autocompactantes (HAC)	21
2.3. Uso del filler en mezclas de base cemento	23
2.4. Filler de recuperación (FR).....	25
2.5. Uso de árido reciclado en mezclas de base cemento	28
2.6. Grouts de relleno de bloques de hormigón	29
2.7. Bloques de hormigón	36
2.8. Marco normativo	43
2.9. Conclusiones y objetivos específicos.....	44
3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LA FASE I	49
3.1. Criterios de selección	49
3.2. Cemento.....	50
3.3. Agua.....	50
3.4. Arena natural	50
3.5. Superplastificante	52
3.6. Filler calizo.....	52
3.7. Filler de recuperación.....	53
3.8. Árido reciclado.....	58
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA FASE I	63
4.1. Dosificaciones.....	63
4.2. Proceso de amasado y fabricación de probetas.....	65
4.3. Propiedades en estado fresco.....	66
4.4. Propiedades en estado endurecido.....	70
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA FASE I.....	77
5.1. Propiedades en estado fresco.....	77
5.2. Propiedades en estado endurecido.....	90

6. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LA FASE II	101
6.1. Criterios de selección	101
6.2. Bloque convencional: Bloque de 20 NORMAL	101
6.3. Bloque <i>con ceniza de fondo de carbón</i>	101
6.4. Mortero autonivelante.....	102
7. PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA FASE II	105
7.1. Preparación de los bloques	105
7.2. Resistencia a compresión de los bloques	107
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA FASE II.....	111
8.1. Resistencia a compresión	111
8.2. Deformaciones de los bloques.....	113
9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	117
9.1. Conclusiones.....	117
9.2. Futuras líneas de investigación.....	118
10. BIBLIOGRAFÍA	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparativa entre las composiciones de un hormigón convencional y uno autocompactante (Okamura and Ouchi, 2003)	22
Figura 2. Recomendaciones para conseguir hormigones autocompactantes (Sheinn, 2007)....	23
Figura 3. Imagen de microscopía electrónica de filler silicio (izda.) y filler de recuperación (dcha.) (Esquinas et al., 2017)	24
Figura 4. Diagrama del funcionamiento de planta de mezclas asfálticas en caliente. Elaboración propia.	25
Figura 5. Ensayo mini-slump. Dimensiones (Okamura and Ouchi, 2003)	31
Figura 6. Embudo empleado en el ensayo minifunnel (Okamura and Ouchi, 2003)	32
Figura 7. Gráfica del modelo Bingham en comparación con un fluido newtoniano (Monn, 2007)	33
Figura 8. Colocación de bloques de hormigón como encofrado para la realización de probetas. ASTM 1019	35
Figura 9. Ejemplos de bloques de hormigones huecos (NORMABLOC, 2007).....	38
Figura 10. Bloque universal (NORMABLOC, 2008).....	38
Figura 11. Ejemplo de bloque de áridos ligeros Arliblock macizo (NORMABLOC, 2008).....	39
Figura 12. Ejemplo de bloque de acabado liso (izda) y acabado split (dcha). Fuente https://prefhorvisa.wordpress.com/descargas/	39
Figura 13. Ejemplos de colores disponibles en el catálogo de Prefhorvisa. Fuente: https://prefhorvisa.wordpress.com/descargas/	39
Figura 14. Ensayo de cortante sobre las uniones de mortero (Hamid, Bolhassani and Moon, 2013).	42
Figura 15. Ensayo de tensión diagonal (Hamid, Bolhassani and Moon, 2013).	42
Figura 16. Estilos de colocación. Running bond (izda) y stack pattern (dcha) (Zohreh, Das and Banting, 2017).	43
Figura 17: Comparación de la granulometría de la Arena 1 y la Arena 2	51
Figura 18. Muestra filler calizo	52
Figura 19. Muestra de filler de recuperación.....	53
Figura 20: Comparación entre granulometría del filler calizo y del filler de recuperación	53
Figura 21. Filler de recuperación (imágenes superiores) y filler calizo (imágenes inferiores)....	54
Figura 22: Difractograma de la muestra del filler calizo	56
Figura 23: Difractograma de la muestra de filler de recuperación	56
Figura 24. Muestra de árido reciclado antes de tamizar (izda) y después de tamizar por el tamiz de 4mm (dcha)	58
Figura 25. Granulometría del árido reciclado en comparación con las arenas naturales	59
Figura 26. Molde para probetas cúbicas (izda) y molde para probetas de retracción (dcha)	66
Figura 27. Proceso de llenado de moldes	66
Figura 28. Medición del escurrimiento en el ensayo de la mesa de sacudidas	67
Figura 29. Grout extendido tras ensayo de minislump.....	68
Figura 30. Dispositivo empleado en el ensayo de minifunnel (Okamura and Ouchi, 2003).....	68
Figura 31. Reómetro Viskomat XL con la pala tipo Window.....	69
Figura 32. Proceso de desmoldado probetas cúbicas.....	70

Figura 33. Prensa Rock Mechanics Test System 815.....	70
Figura 34. Probeta colocada en la máquina de ensayo (izda) y probeta tras finalizar el ensayo (dcha).	71
Figura 35. Ensayo de ultrasonidos	71
Figura 36. Probetas de retracción	72
Figura 37. Ensayo de retracción	73
Figura 38. Preparación de probetas para los ensayos de control por deformación y módulo de Young.....	74
Figura 39. Resultados del ensayo minislump en t = 21 minutos.....	77
Figura 40. Evolución de los valores de escurrimiento (minislump) de la serie sin árido reciclado	78
Figura 41. Evolución de los valores de escurrimiento (minislump) de la serie con árido reciclado	78
Figura 42. Resultados del ensayo mesa de sacudidas para t = 21 minutos	79
Figura 43. Evolución de los valores de escurrimiento (mesa de sacudidas) de la serie con árido reciclado	80
Figura 44. Evolución de los valores de escurrimiento (mesa de sacudidas) de la serie sin árido reciclado	80
Figura 45. Resultados del ensayo minifunnel a t = 21 minutos	81
Figura 46. Evolución de los valores obtenidos en el minifunnel, de la serie sin árido reciclado	81
Figura 47. Evolución de los valores obtenidos en el minifunnel, de la serie con árido reciclado.	82
Figura 48. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 7 min de reposo de mezclas sin árido reciclado.....	83
Figura 49. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 20 minutos de reposo de las mezclas sin árido reciclado.....	84
Figura 50. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 7 minutos de reposo de mezclas con árido reciclado	85
Figura 51. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 20 minutos de reposo de mezclas con árido reciclado	85
Figura 52. SGT de las dosificaciones con 0% de filler de recuperación.....	86
Figura 53. SGT de las dosificaciones con 25% de filler de recuperación.....	86
Figura 54. SGT de las dosificaciones con un 50% de filler de recuperación.....	87
Figura 55. SGT de las dosificaciones con un 75% de filler de recuperación.....	87
Figura 56. SGT de las dosificaciones con un 100% de filler de recuperación.....	88
Figura 57. Viscosidad en unidades relativas. FCT 7 minutos.....	89
Figura 58. Viscosidad en unidades relativas. FCT 20 minutos.....	89
Figura 59. Torque dinámico FCT 7 minutos.....	90
Figura 60. Torque dinámico FCT 20 minutos.....	90
Figura 61. Retracción de las dosificaciones sin árido reciclado	91
Figura 62. Retracción de las dosificaicones con árido reciclado	92
Figura 63. Probetas de grout ensayadas a compresión	93
Figura 64. Resistencia a compresión de los distintos grouts a 28 días	93
Figura 65. Evolución de las resistencias a compresión de las dosificaciones sin árido reciclado.....	94

Figura 66. Evolución de las resistencias a compresión de las dosificaciones con árido reciclado	94
Figura 67. Resultados ensayo control por deformación	95
Figura 68. Resultados ensayo ultrasonidos a 28 días.....	96
Figura 69. Módulo de elasticidad secante de los distintos grouts	97
Figura 70. Proceso de llenado de los bloques de hormigón	105
Figura 71. Proceso de refrentado de la primera cara de los bloques	106
Figura 72. Bloques refrentados y con las galgas ya colocadas.....	107
Figura 73. Resultados del ensayo de resistencia a compresión de los bloques rellenos y vacíos	111
Figura 74. Bloques rellenos ensayados a compresión	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características cemento CEM II A-V 42,5 R (Elaboración propia a partir de ficha técnica)	50
Tabla 2. Porcentaje pasa acumulado de las arenas 1 y 2	51
Tabla 3. Densidades y absorción de la arena 1 y arena 2	52
Tabla 4. Propiedades del superplastificante MasterEase 3530 (Elaboración propia a partir de ficha técnica)	52
Tabla 5. Fluorescencia de rayos X del filler calizo y filler de recuperación	57
Tabla 6. Granulometría del árido reciclado en comparación con la Arena 1 y la Arena 2	58
Tabla 7. Densidades y absorción del árido reciclado en comparación con las arenas naturales	59
Tabla 8. Dosificaciones de la serie con árido reciclado en volumen (l)	64
Tabla 9. Dosificaciones de la serie con árido reciclado en masa (kg)	64
Tabla 10. Dosificaciones de la serie sin árido reciclado en volumen (l)	64
Tabla 11. Densidad en fresco de los grouts sin árido reciclado	82
Tabla 12. Densidad en fresco de los grouts con árido reciclado	82
Tabla 13. Módulo de elasticidad dinámico de grouts sin árido reciclado	96
Tabla 14. Módulo de elasticidad dinámico de grouts con árido reciclado	96
Tabla 15. Características del mortero autonivelante (Elaboración propia a partir de ficha técnica del fabricante)	102
Tabla 16. Factor de forma "d" para el cálculo de la resistencia a compresión normalizada (AENOR, 2016a)	113
Tabla 17. Resistencias a compresión normalizadas fb	113

1.INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La optimización de recursos junto con la reducción y valorización de los residuos generados durante cualquier proceso productivo se ha convertido en una necesidad en los últimos años. En la Unión Europea, este camino hacia un modelo de economía circular comenzó a materializarse en 2015 con el Plan de Acción de Economía Circular (Comisión Europea, 2015), un ambicioso conjunto de propuestas que atañe a todos los sectores de la economía, entre los que destaca el sector de la construcción precisamente por su alto consumo de recursos y, sobre todo, por la gran cantidad de residuos que genera (Esquinas *et al.*, 2018).

La industria del hormigón, como uno de los principales responsables de los datos del sector de la construcción, ha estudiado en los últimos años como mejorar la situación con diferentes propuestas. Una de ellas, enfocada hacia la reducción del consumo de recursos, es la sustitución de parte de los componentes del hormigón por residuos de otras industrias. Esta sustitución puede referirse al propio cemento, a los áridos finos o a los áridos gruesos.

En cuanto a sustitución de los áridos gruesos, el material más empleado es el árido reciclado. Este material proviene de residuos del propio sector de la construcción que, tras un proceso de selección y tratamiento, puede ser empleado de nuevo en la elaboración de hormigones. La Instrucción del Hormigón Estructural, EHE-08 (CPH, 2011), fija en un 20% el máximo de sustitución posible para hormigones de carácter estructural, siempre sustituyendo la fracción gruesa.

Por otro lado, la sustitución de la fracción fina cuenta con numerosas alternativas provenientes de residuos de éste y otros sectores. Estos residuos puede ser de origen orgánico, como cenizas provenientes de cáscaras de arroz, hoja de bambú o ceniza de mazorca de maíz (González-kunz *et al.*, 2017) o de origen inorgánico, como cenizas volantes, cenizas de fondo de carbón o filler de recuperación. Éste último, será el objeto de estudio en este trabajo.

El filler de recuperación es un residuo que se genera en las plantas de mezclas bituminosas en caliente, durante el secado de los áridos. El polvo mineral producido en este proceso es separado a través de filtros de aire y es almacenado inicialmente en silos. Las propias mezclas bituminosas emplean este residuo en sus dosificaciones pero en un porcentaje reducido de entre un 3 y un 4% (Esquinas *et al.*, 2018). El resto es llevado a vertederos suponiendo un alto coste medioambiental para la zona de vertido y un coste económico para la empresa.

Según la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), en 2018 se produjeron en España 16,1 millones de toneladas de mezclas asfálticas en caliente (ASEFMA, 2019). Teniendo en cuenta que se genera aproximadamente 40kg de filler de recuperación por tonelada de mezcla bituminosa fabricada (Esquinas *et al.*, 2018), se estima que la producción de este residuo solo en España durante el 2018, ascendió a 644.000 toneladas. Es por ello, que su empleo para este tipo de grouts u otro tipo de hormigones que requieran gran cantidad de finos, como los autocompactantes, supondría un mejor aprovechamiento de recursos disminuyendo el consumo energético y minimizando la cantidad de vertido (Esquinas *et al.*, 2017).

Los propios hormigones autocompactantes, aunque fueron creados con una finalidad distinta a la optimización de recursos, supusieron uno de los cambios más significativos que ha experimentado en los últimos años la industria. Diseñado en Japón en 1986, este hormigón se caracteriza por su capacidad de fluir y rellenar pequeños huecos sin presentar segregación ni necesitar vibrado posterior, consiguiendo reducir tanto costes económicos, como consumo energético y plazos de entrega (Martín *et al.*, 2013). Otra de las principales ventajas de estos hormigones es que pueden adoptar prácticamente cualquier forma, abriendo la posibilidad a estructuras más eficientes realizadas con menor cantidad de material.

Como se muestra en el trabajo de los investigadores Okamura y Ouchi (2003), la principal diferencia entre una dosificación de hormigón convencional y uno autocompactante, además de la presencia de aditivos, es la disminución de árido grueso y el aumento de finos. Estos finos engloban tanto al cemento como a la adición de fillers.

Otro de los caminos para conseguir una optimización del uso de recursos por parte de la industria del hormigón, es la prefabricación. Supone la posibilidad de incorporar las ventajas de un proceso productivo en serie, a la fabricación de elementos de hormigón, obteniendo piezas de mayor calidad a través de un control de su ejecución exhaustivo, imposible de conseguir en obra.

Dentro del abanico de productos prefabricados de hormigón que podemos encontrar hoy en día, como todo tipo de vigas, bovedillas, forjados, escaleras etc., encontramos los bloques de hormigón. Este material de albañilería, surgido en el siglo XX, presenta numerosas ventajas constructivas, entre las que destacan su versatilidad estética, al contar con numerosas opciones de acabado y color, capacidad resistente, pudiendo incorporar relleno e incluso armadura en su interior, y su facilidad de montaje en obra.

Con todo ello, el principal objetivo de este trabajo es analizar la influencia que produce la sustitución del filler calizo por filler de recuperación y su comportamiento conjunto con árido reciclado, en grouts de relleno para bloques de hormigón.

1.2. Contenido del documento

Este documento está estructurado en diez capítulos:

- Capítulo 2: Estado del arte y objetivos específicos. Este apartado recoge la revisión bibliográfica de las distintas fuentes utilizadas para la realización de esta investigación, aportando el conocimiento necesario para la realización de la campaña experimental. Tras el análisis del estado del arte, se establecen los objetivos específicos del trabajo.
- Capítulo 3, 4 y 5: Estos capítulos corresponden con la Fase I de este proyecto. Se caracterizarán todos los materiales empleados para la elaboración de los grouts, describiendo los ensayos realizados a cada uno, así como los datos técnicos aportados por los fabricantes durante el capítulo 3. A continuación, en el capítulo 4, se describirán los ensayos realizados durante el programa experimental, de acuerdo con la normativa

vigente y, por último, en el capítulo 5, se mostrarán los resultados obtenidos junto con un análisis de estos.

- Capítulos 6, 7 y 8. Estos capítulos corresponden con la Fase II de este proyecto. Al igual que en la fase I, se comenzará describiendo los bloques y grouts empleados durante la fase experimental en el capítulo 6. Posteriormente se describirán los ensayos realizados en el capítulo 7 y finalizará la fase con el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo 8.
- Capítulo 9: Conclusiones y futuras líneas de investigación. Este capítulo resumirá las conclusiones obtenidas a lo largo de la campaña experimental, así como las siguientes fases del proyecto, que completarán a las dos aquí descritas.
- Capítulo 10: Bibliografía. Listado por orden alfabético de autor de las referencias utilizadas a lo largo de todo el documento.

2. ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo, produciéndose más de 20.000 millones de toneladas cada año (Vandamme and Ulm, 2009). Su gran popularidad es debida a la combinación de prestaciones que ofrece, como pueden ser sus altas resistencias mecánicas, su durabilidad, adaptabilidad a distintos ambientes, capacidad de reproducir prácticamente cualquier forma y su bajo coste. Sin embargo, su alta aceptación y uso hacen que sea un material que consume ingentes cantidades de recursos para cubrir la demanda, dejando una importante huella en el medioambiente tanto en su cuna como en su tumba.

El consumo de agua a nivel mundial para la producción de hormigón es aproximadamente de un billón de litros, y en estos cálculos no se incluye el agua de curado. El componente principal del hormigón, el cemento, por cada tonelada producida, genera una tonelada de CO₂ y consume 4GJ de energía (Meyer, 2013).

Pero no son todos aspectos negativos. Normalmente se produce con materiales locales, lo que minimiza los costes tanto económicos como energéticos derivados del transporte. El acero con el que se refuerza se puede reciclar casi en su totalidad y, mediante el proceso de carbonatación, absorbe CO₂ de la atmósfera, reduciendo parcialmente el generado durante su fabricación. Además, existen numerosos residuos que pueden ser empleados para la sustitución parcial de alguno de sus componentes, como las cenizas volantes en sustitución del cemento, o residuos de la demolición de elementos de hormigón, como sustituto de los áridos (Meyer, 2013).

Otro de estos residuos es el estudiado en este proyecto: el filler de recuperación generado en las plantas asfálticas en caliente. A diferencia del árido reciclado, cuya incorporación al hormigón está aceptada y extendida, contando con un anejo en la EHE-08, el filler de recuperación es desconocido en este campo. De hecho, existen muy pocos ejemplos de su uso y la práctica totalidad de los casos encontrados presentan estudios de cómo incorporar este residuo para la elaboración de hormigones autocompactantes. El objetivo de esta fase del proyecto no es la elaboración de hormigones o grouts autocompactantes. No obstante, es una condición deseable a la hora de facilitar el relleno de los bloques y su uso es cada vez más extendido por lo que se expondrá una breve introducción al concepto a continuación.

2.2. Hormigones autocompactantes (HAC)

La facilidad de un mortero o hormigón para ser capaz de rellenar una cavidad o fluir a través de las barras de las armaduras rellenando por completo los encofrados sin necesidad de vibrado es una de las características más buscadas a la hora de diseñar una dosificación en los últimos años (Lai, Hanzic and Ho, 2018). Este tipo de hormigones, llamados autocompactantes, fueron creados en la universidad de Tokyo en la década de los 80 y pronto comenzaron a ganar

popularidad en el resto del mundo. Su origen radica en la necesidad de conseguir estructuras de hormigón duraderas sin la necesidad de emplear personal cualificado, el cual escaseaba en la época en Japón (Okamura and Ouchi, 2003).

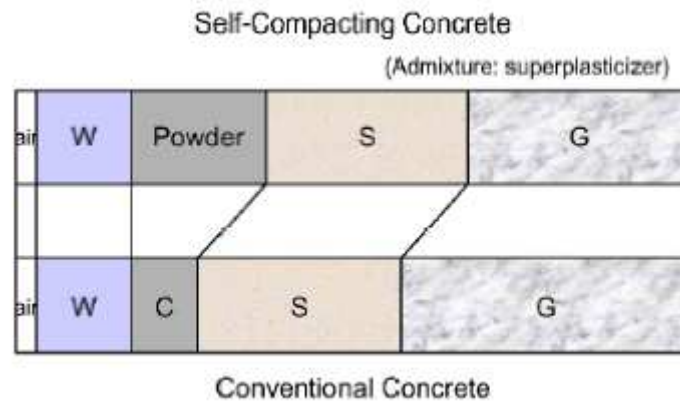


Figura 1. Comparativa entre las composiciones de un hormigón convencional y uno autocompactante (Okamura and Ouchi, 2003)

El hormigón autocompactante se podría definir por tanto como “hormigón capaz de fluir por su propio peso, capaz de rellenar por completo el encofrado, aun en presencia de armaduras, sin la necesidad de ser vibrado” (Sheinn, 2007). Este hormigón no solo facilita la puesta en obra, sino que también reduce el tiempo de ejecución, consigue un acabado de mayor calidad, reduce los costes y la contaminación acústica producida por el vibrado y evita la segregación incluso con mayores distancias de vertido (Maaruf and Abba, 2018).

La dificultad que plantea la elaboración de un hormigón o mortero autocompactante radica en el diseño de la dosificación y en la precisión con la que se ejecute. Pequeños errores al pesar los materiales que no afectarían a un hormigón convencional, pueden suponer pérdida de autocompactabilidad o incluso segregación en los autocompactantes (Bonen *et al.*, 2007). Además, estos hormigones deben mantener sus propiedades de estado en fresco durante al menos 90 minutos para proporcionar tiempo suficiente al transporte y colocación en obra (Sheinn, 2007).

Además de la composición, el proceso de amasado y los tiempos de descanso durante el mismo también juegan un papel importante a la hora de determinar la tixotropía de un hormigón (Bonen *et al.*, 2007), por lo que también tendrán que ser estudiados y realizados con exactitud.

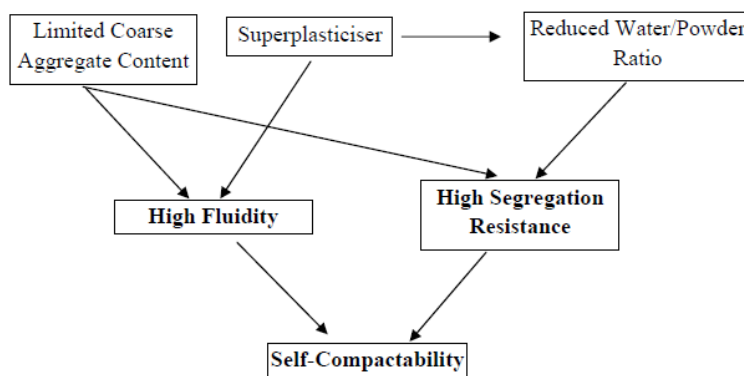


Figura 2. Recomendaciones para conseguir hormigones autocompactantes (Sheinn, 2007)

En el trabajo de los investigadores Bonen y asociados (2007) se hace mención al término “robustez” como magnitud para evaluar la estabilidad de un hormigón tanto en su fase de fabricación, transporte y colocación (estabilidad dinámica) como en la fase de endurecimiento (estabilidad estática). Una robustez baja supone un hormigón con una baja trabajabilidad y baja durabilidad, así como posibles apariciones de segregación. Esta característica dependerá también de la aplicación para la que se esté diseñando el hormigón, puesto que puede presentar valores elevados para un uso en suelo pero presentar segregación si es empleada en columnas de grandes dimensiones (Bonen *et al.*, 2007).

Valores altos de robustez pueden ser alcanzados mediante el empleo de aditivos superplastificantes o incorporación de filler. Los aditivos superplastificantes, compuestos por policarboxilatos, favorecen la trabajabilidad sin necesidad de aumentar el contenido de agua de la mezcla. Sin embargo, una adición excesiva de estas sustancias o el empleo de este aditivo en dosificaciones con un bajo porcentaje de finos, puede dar lugar a segregación (Lai, Hanzic and Ho, 2018). En el trabajo de Georgiadis y asociados (2010) se demuestra como el empleo de superplastificantes no es capaz de compensar por sí solo la falta de finos de la arena empleada, causando segregación en el hormigón diseñado, mientras que las dosificaciones que incorporan filler calizo, sí que lo consigue. Cabe mencionar, que un exceso de finos sin el empleo de superfluidificantes, necesitaría una relación agua cemento elevada, lo que conllevaría una reducción significativa de las resistencias obtenidas.

Por lo tanto, la dosificación ha de ser tal que permita al hormigón tener una tensión de flujo umbral baja para poder fluir y rellenar todos los huecos y que, al mismo tiempo, posea una viscosidad suficiente para mantener la estabilidad y evitar la segregación (Sheinn, 2007).

2.3. Uso del filler en mezclas de base cemento

2.3.1. Introducción

Según lo dispuesto en la norma UNE-EN 933-2/1M:1999 (AENOR, 1999b), “*se considera como filler o polvo mineral, a la fracción de árido que pasa por el tamiz de 0,063 mm*”. En el ámbito de

las mezclas bituminosas y, atendiendo a su procedencia, el filler puede clasificarse como filler de aportación o de recuperación.

El primero se trata de un filler comercial, generalmente calizo, cuyas propiedades físicas y químicas son conocidas y controladas durante su proceso de producción. Se obtiene mediante el filtrado del aire de los procesos de machaqueo de los áridos en las canteras (Sümer, 2007).

El filler de recuperación en cambio, es un subproducto generado en el proceso de secado de los áridos en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente, y no se pueden conocer con tal nivel de precisión sus características físicas ni químicas, puesto que éstas dependerán del tipo de árido origen, de las condiciones del proceso y de la cantidad de contaminantes procedentes de hidrocarburos. El filler se obtiene a través de unos filtros de mangas situados en los tambores empleados para el secado de los áridos (Khouadjia, Belebchouche and Bensac, 2019).

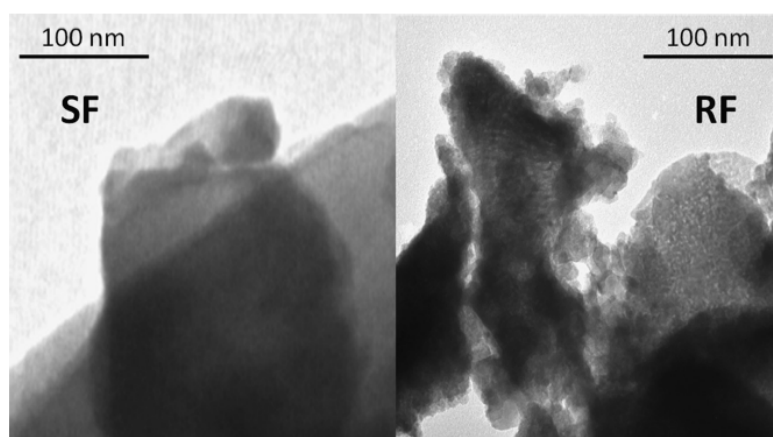


Figura 3. Imagen de microscopía electrónica de filler silicio (izda.) y filler de recuperación (dcha.) (Esquinas et al., 2017)

2.3.2. Filler de aportación

El uso del filler dentro de la composición del hormigón puede resultar ventajoso o perjudicial, dependiendo de la finalidad, naturaleza, cantidad utilizada y combinación con otros materiales. Su elevada superficie específica genera una mayor demanda de agua, lo que puede desencadenar en una mayor retracción. Este y otros aspectos negativos pueden subsanarse con el empleo conjunto del filler con un aditivo superplastificante, que evite la pérdida de trabajabilidad sin tener que aumentar la relación agua/cemento, evitando así las resistencias bajas y la elevada retracción (Sümer, 2007).

Por otra parte, si los áridos empleados no contienen suficientes finos, la mezcla puede llegar a segregarse o presentar un contenido excesivo de poros no deseados, por lo que la incorporación de filler en estos casos sería suficiente para subsanar esos problemas (Sümer, 2007). En general, la incorporación de filler, en su justa medida, mejora la adhesión de la pasta con el árido, mejora la trabajabilidad y las resistencias mecánicas (Khouadjia, Belebchouche and Bensac, 2019). Para conocer la cantidad apropiada de sustitución, deberá estudiarse la forma de las partículas, la superficie específica y la granulometría del filler empleado, así como los resultados de ensayos

en fresco realizados con los materiales a emplear, para comprobar además la interacción entre el filler estudiado y el resto de componentes (Felekoglu *et al.*, 2006).

2.4. Filler de recuperación (FR)

2.4.1. Obtención del filler de recuperación

El filler de recuperación (FR) utilizado en este proyecto procede de la planta de mezclas bituminosas en caliente que la empresa EXTRACO posee en Allariz (Orense), cuyo funcionamiento se explica a continuación.

El proceso de producción de mezclas bituminosas empieza con la pre-dosificación automática de los áridos provenientes de las tolvas de almacenaje, que son conducidos mediante cintas transportadoras a un tambor secador. En este proceso de calentamiento dentro del tambor, es donde se procede a la extracción del filler de recuperación.

Los áridos al secarse en el tambor giratorio liberan parte del polvo mineral, el cual pasa a estar suspendido en el aire. Mediante sistemas de extracción, se hace pasar ese aire por una batería de filtros de mangas y se separa el filler, el cual pasa a acumularse dentro de un silo. Parte de este material es posteriormente utilizado en la fabricación de las mezclas bituminosas, pero en un porcentaje pequeño de entre el 3 y el 4% (Esquinas *et al.*, 2018), el resto es acumulado para su posterior transporte al vertedero.

Los áridos una vez secados y dosificados según la mezcla asfáltica a fabricar, se juntan con el ligante caliente y con el filler de aportación y recuperación, amasándose de forma conjunta en la amasadora. De aquí, el producto ya preparado es conducido a una tolva bajo la que se situarán los camiones para su posterior transporte a obra.

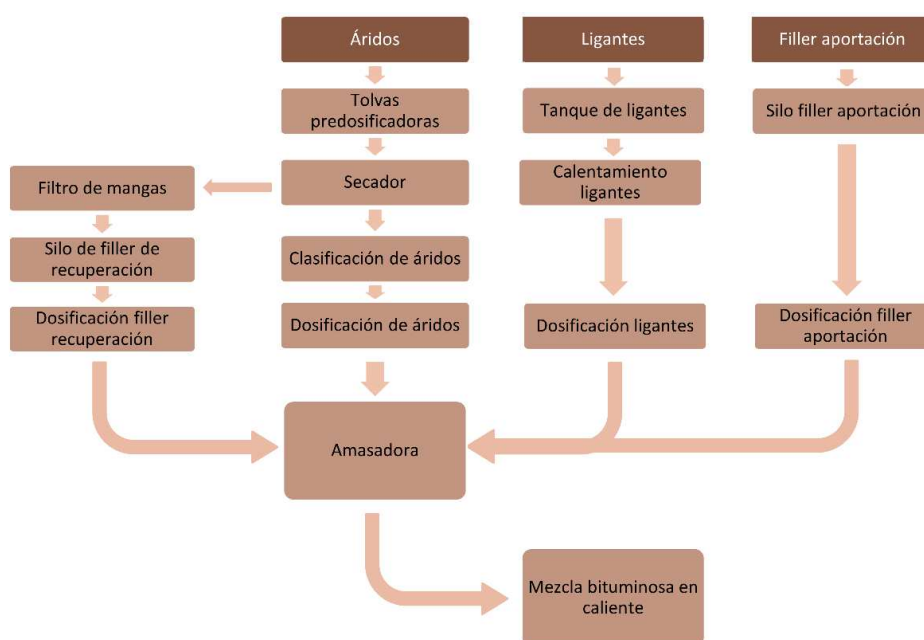


Figura 4. Diagrama del funcionamiento de planta de mezclas asfálticas en caliente. Elaboración propia.

2.4.2. Propiedades en fresco y resistencia a compresión de hormigones autocompactantes con FR

En el estudio de Martín y asociados (2013) se analiza cómo realizar un hormigón autocompactante utilizando este residuo en sustitución del filler convencional. El ensayo busca conseguir resultados similares manteniendo constante la cantidad de cemento y la relación agua/cemento en las distintas mezclas, pero aumentando la cantidad de superplastificante para las dosificaciones que cuentan con este residuo. Con este último cambio consiguen mitigar los problemas de trabajabilidad que supone para las mezclas el empleo de este tipo de filler, puesto que cuenta con una mayor superficie específica y un tamaño de partículas superior que el filler comercial. Sus resultados muestran como la resistencia a compresión de los dos hormigones creados son prácticamente idénticas a partir de los 7 días de edad. A cortas edades, los hormigones con filler de recuperación presentan resultados inferiores causados por una menor velocidad de hidratación del cemento. En cuanto a las propiedades en fresco, se mantienen resultados similares, una vez más debido al cambio de cantidad de aditivo empleado en función del filler.

En el trabajo de Esquinas y asociados (2017) se busca un objetivo similar, con la diferencia de que su filler comercial contra el que comparar el filler de recuperación, es de naturaleza silíceo. Los resultados obtenidos indican una disminución de la resistencia a compresión para las mezclas con filler de recuperación, diferencia acentuada especialmente a edades tempranas. Los ensayos en fresco vuelven a mostrar la diferencia en trabajabilidad que se produce al sustituir el filler, obteniendo peores resultados por las mezclas con este residuo en todos los ensayos. Estos resultados se repiten también en el estudio (Khouadjia, Belebchouche and Bensac, 2019) en el que, a diferencia de los anteriores, el material sustituido por el filler de recuperación es el cemento.

2.4.3. Retracción en hormigones autocompactantes con FR

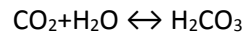
En el estudio de Esquinas y asociados (2017) los resultados del ensayo de retracción, muestran como a cortas edades, los hormigones con filler de recuperación presentan menores retracciones que los realizados con filler silíceo, debido a la alta reactividad que éste último presenta y al menor tamaño de sus partículas, características que facilitan la hidratación del cemento y generan esas diferencias en la retracción. A edades avanzadas, 91 días, los resultados se estabilizan, pero manteniéndose el filler de recuperación con mejores resultados.

2.4.4. Durabilidad en hormigones autocompactantes con FR

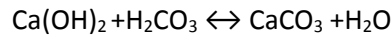
En cuanto a la durabilidad, las mezclas creadas con filler de recuperación, según los resultados obtenidos por Esquinas y asociados (2018), presentan un peor comportamiento frente las mezclas generadas con filler comercial silíceo debido a una mayor porosidad del material tanto en la carbonatación como en la penetración de sulfatos.

La carbonatación es uno de los factores que más influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, siendo causa principal de su deterioro. Es el proceso por el que los compuestos hidratados del cemento, en contacto con el CO₂ de la atmósfera, reaccionan formando carbonato cálcico insoluble (CaCO₃):

- 1) En primer lugar, el dióxido de carbono de la atmósfera entra en contacto con el agua retenida en los poros y forma ácido carbónico:



- 2) A continuación, el ácido carbónico en contacto con la portlandita (hidróxido de calcio) reacciona generando carbonato cálcico insoluble más agua:



Estas reacciones reducen el pH del material por debajo de 9, lo que elimina la protección del acero, facilitando su corrosión. Este proceso continua desde el exterior hacia el interior hasta que llega a las armaduras, las cuales comienzan a oxidarse (Martins *et al.*, 2018a).

Las mezclas con filler de recuperación presentan una mayor cantidad de portlandita susceptible de ser carbonatada debido a que el hidróxido de calcio generado durante el proceso de curado reacciona con el filler silíceo, pero no con el de recuperación. Esto se traduce en una penetración de CO₂ un 30% mayor en el filler de recuperación que en el silíceo (Esquinas *et al.*, 2018). Los investigadores Martin y asociados (2013) también obtuvieron los mismos resultados en cuanto a carbonatación, aunque con pequeñas diferencias debido a las distintas edades a las que comenzaron la exposición al ambiente carbonatado.

Aunque en el presente estudio no se realizará ninguna actuación con armadura y el proceso de carbonatación no serían un problema *a priori*, se incluye como parte de la revisión bibliográfica para servir de base a futuras continuaciones de la investigación en las que sí se incluya el refuerzo armado.

Los sulfatos reaccionan tanto con el cemento como con componentes del proceso de hidratación generando sulfatos de calcio y sulfoaluminatos, los cuales pueden llegar a generar la desintegración del material. El peor comportamiento de las mezclas con filler de recuperación es causado una vez más por mayor presencia de portlandita así como una mayor cantidad de etringita (Esquinas *et al.*, 2018).

2.4.5. Ciclo de hielo-deshielo en hormigones autocompactantes con FR

El experimento de ciclo hielo-deshielo en mezclas de base cemento con FR, solo hay constancia de haber sido realizado en una ocasión (Khouadjia, Belebchouche and Bensac, 2019). En ese trabajo, se muestra como la incorporación de filler de recuperación nuevamente perjudica al hormigón, debido a su alta absorción de agua. Esta agua absorbida durante los ciclos de hielo y deshielo provoca mayor cantidad de micro fisuras, lo que, a su vez, provoca una disminución de las resistencias. Cabe destacar, que los investigadores afirman que estos efectos resultan mínimos si la sustitución de filler de recuperación no sobrepasa el 10%.

2.5. Uso de árido reciclado en mezclas de base cemento

2.5.1. Introducción

Una de las principales líneas de trabajo para conseguir que el sector de la construcción sea más sostenible es la reducción de la gran cantidad de residuos generados. En España, durante la primera década de los 2000, se generaban en torno a 750 kg/habitante x año de RCDs (Residuos de construcción y demolición) (González-Fontebao and Martínez-Abella, 2005). Esta cifra indica la importancia de buscar un uso alternativo a estos deshechos alargando la vida útil de los materiales empleados en su fabricación.

La utilización de parte los RCDs como áridos para la fabricación de morteros y hormigones, no es nueva. Comenzó a popularizarse a partir de la década de los 80, debido a las ventajas medioambientales que generaba ya no solo a nivel de consumo de recursos sino que también a la reducción de acúmulos de residuos (Agyekum, 2018). Además, usar estos residuos en sustitución del árido natural disminuiría el elevado consumo de áridos que el sector de la construcción posee. Se estima que a nivel mundial, en 2014 la cantidad de áridos empleados por el sector ascendía a 4×10^{10} toneladas y se estima que para este año, 2019, la cifra alcance las $5,2 \times 10^{10}$ toneladas (Kurda, Brito and Silvestre, 2019).

2.5.2. Clasificación

En función de su composición, los áridos pueden dividirse en tres categorías: Árido reciclado de hormigón, árido reciclado cerámico y árido reciclado mixto (Seara-Paz, 2015). Los nombres de las categorías son indicativos del contenido que cada árido posee. El árido reciclado de hormigón proviene del machaqueo de residuos de hormigón realizado con cemento y áridos naturales. El árido reciclado cerámico, está constituido principalmente por materiales cerámicos y, por último, el árido reciclado mixto está compuesto de una mezcla de ambos, con la salvedad de que deberá contar con al menos un 50% de residuos de hormigón y una densidad seca superior a $2,1 \text{ t/m}^3$ (Seara-Paz, 2015).

2.5.3. Comportamiento de hormigones realizados con árido reciclado

La incorporación de áridos reciclados en el hormigón tiene sus aspectos negativos también. Uno de los principales problemas derivados del uso de este tipo de áridos es la falta de consistencia en la calidad y propiedades del producto final, puesto que varían en función de los materiales entrantes en las fábricas de reciclado (Yehia *et al.*, 2015). Es por ello recomendable realizar ensayos de granulometría y absorción al menos para poder diseñar correctamente las dosificaciones a estudiar si se desea emplear este residuo.

En cuanto al comportamiento de los hormigones y morteros en fresco, las mezclas realizadas con este residuo suelen tener peor comportamiento a la hora de obtener consistencias blandas o de autocompactación. La gran cantidad de finos y, sobre todo, la acción de las partículas de mortero adherido presentes en este residuo, se traducen en un aumento de la absorción y de la

retracción (Fathifazl *et al.*, 2011) seguidas de una disminución en módulo de deformación y de las resistencias (Agyekum, 2018). Cabe mencionar que estos efectos se vuelven mínimos si se utiliza un porcentaje de sustitución inferior al 20% (González-Fonteboá and Martínez-Abella, 2005). Otros autores como Yehia y asociados (2015) elevan ese porcentaje hasta el 30% con la salvedad de que las resistencias obtenidas por esos hormigones a edades tempranas sí que se ven reducidas así como los valores del módulo de elasticidad, los cuales descendían en un 15%.

El aumento de absorción de estos áridos también conlleva una disminución de la durabilidad de las mezclas realizadas con este residuo, puesto que el aumento del volumen de poros genera un aumento de carbonatación así como una mayor entrada de agua, sulfatos y demás sustancias perjudiciales para el hormigón o las armaduras (Yehia *et al.*, 2015).

Algunos de los aspectos negativos aquí mencionados pueden subsanarse mediante la adición de otros compuestos o variando las cantidades en las dosificaciones. Ejemplo de esto puede ser un aumento del contenido de aditivo superplastificante para conseguir tener consistencias más fluidas, o incluir en las mezclas otros residuos que suplan los déficits generados por éste. Los investigadores Kurda y asociados (2019), observaron como las mezclas realizadas con árido reciclado y ceniza volante, obtenían mejores resultados que las que contenían o bien solo árido reciclado, o solo ceniza volante. Con la adición de los dos residuos no se conseguía llegar a los valores del hormigón de referencia, pero se disminuía la diferencia existente. Los investigadores también concluyen que la adición de los dos residuos juntos reduce la retracción sufrida por los hormigones en un 10% si se compara con la suma de los efectos de cada residuo por separado.

En España el uso de áridos reciclado para elementos estructurales está definido en el Anejo 15 de la EHE-08 (CPH, 2011), en el que se indica que se podrá sustituir un máximo de un 20% del total de árido a utilizar y solo de la fracción gruesa, no se permite el uso de la arena para la realización de hormigones estructurales.

2.6. Grouts de relleno de bloques de hormigón

2.6.1. Introducción

El grout de relleno para bloques de hormigón, según el ACI (*American Concrete Institute*) es una mezcla de cemento y agua a la que se le puede incorporar áridos finos y/o gruesos y que cuenta con un asentamiento elevado que le permite rellenar con facilidad los huecos donde sea vertido (ACI, 2005).

A los materiales anteriormente mencionados, se le pueden añadir aditivos para compensar o mejorar alguna característica del grout que se desee emplear. Entre estos aditivos suelen encontrarse superplastificantes para aumentar la fluidez de las mezclas sin necesidad de incorporar más cantidad de agua, reductores de retracción para limitar la pérdida de agua del grout a través del medio absorbente que supone los bloques, acelerantes para reducir el tiempo de fraguado sobre todo en climas fríos o, retardadores para ser empleados en climas cálidos donde se desee mantener las condiciones de trabajabilidad iniciales durante un periodo de tiempo mayor (IMI, 2009).

A menudo puede confundirse el término de grout con el de mortero, puesto que comparten numerosas similitudes. Sin embargo, existen dos características que sirven para diferenciar ambos conceptos:

- Los morteros han de contener árido fino en sus dosificaciones, mientras que los grouts pueden o bien no contener ningún árido, o solo árido fino, o mezcla de árido fino y grueso.
- El grout cuenta con una consistencia tal que facilita su colocación y el relleno de huecos, mientras que los morteros no suelen contar con esta característica, utilizándose principalmente como material de adherencia.

Algunos de los ejemplos de uso de estos grouts pueden ser el relleno de los cables de postensado del hormigón armado, grout para la realización de elementos prefabricados o, el que nos concierne en este proyecto, grout de mampostería.

La incorporación de estos grouts a los bloques vacíos mejora los valores de resistencia a compresión, resistencia al fuego, aislamiento acústico, resistencia a impactos y sirve como elemento de unión entre bloque y armadura en el caso de ser necesaria (Fonseca *et al.*, 2019).

Este tipo de hormigones de relleno ofrece una nueva oportunidad con la que aumentar la sostenibilidad y disminuir el alto consumo de recursos del sector de la construcción, pudiendo sustituir parte de los componentes del grout por residuos de este u otros sectores. Una de las posibles formas de conseguir estos objetivos, viene recogido en el trabajo de los investigadores Fonseca y asociados (2015) en el que se plantea la sustitución parcial del cemento portland por ceniza volante o escoria de alto horno. Con este tipo de cambio, no solo se reduce el impacto ambiental que produce la fabricación del cemento portland, sino que hay que sumar también el beneficio de incorporar un nuevo uso a un residuo que de otra forma iría a vertedero, así como la consiguiente reducción del coste económico. Su estudio concluye con que grouts realizados con 65% de ceniza volante o hasta un 85% de sustitución de cemento (20 % de ceniza volante y 65% de escoria de alto horno) cumplían los requisitos mínimos de resistencia a compresión fijados por la norma americana de 13,8 MPa. La incorporación de estos residuos a mezclas de base cemento ya había sido estudiada ampliamente para otras aplicaciones, pero no en grouts de relleno de bloques.

Además de estos residuos, en la literatura se pueden encontrar diferentes estudios en los que sustituyen parte del cemento por diferentes materiales, incluso de origen orgánico. En el estudio de González-kunz y asociados (2017) se recogen numerosos ejemplos de uso de cenizas procedentes de la combustión de materia orgánica, como por ejemplo de la combustión de residuos de la producción de aceite de palma, de cáscaras del arroz, de hojas de bambú, de residuos de la cosecha de maíz, etc. para la producción de mezclas de base cemento. Todos ellos presentados bien como mejora del comportamiento reológico, como mejora de las resistencias mecánicas debido a su carácter puzolánico o solo como medio de reducción de acumulación de residuos en vertederos y disminución de consumo de recursos naturales.

2.6.2. Caracterización del grout en estado fresco

Al igual que para la caracterización de un mortero o de un hormigón, en la caracterización de los grouts hay que diferenciar la fase de estado en fresco y la fase de endurecido. El estado en fresco recoge el periodo de tiempo que transcurre desde que se finaliza el proceso de amasado hasta que la mezcla comienza a endurecerse y solidificarse. Las propiedades medidas en este estado influyen la facilidad de puesta en obra, posibilidades de forma de vertido y la calidad de los acabados.

Ensayo de escurrimiento

Para caracterizar el escurrimiento se pueden emplear dos técnicas similares, cuya diferencia radica en el tamaño del molde. La primera, el ensayo del cono de Abrams, es descrito en la norma UNE-EN 12350-2:2009 y se emplea para la caracterización de hormigones. En este ensayo, se emplea un molde tronco cónico de 300mm de altura, 100mm de diámetro superior y 200mm de diámetro inferior.

Cuando el grout no cuenta con árido grueso en su composición, también puede emplearse dicho molde. No obstante, los investigadores Okamura y Ouchi (2003) muestran en su trabajo un ensayo de características similares pero con un molde de menor envergadura.

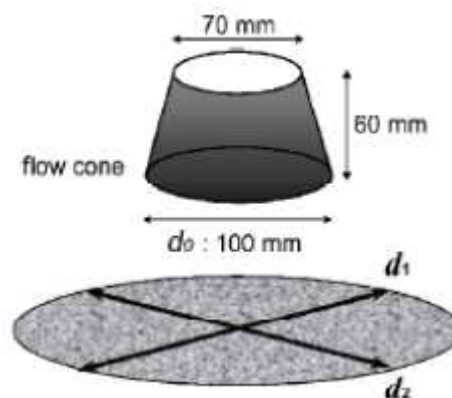


Figura 5. Ensayo mini-slump. Dimensiones (Okamura and Ouchi, 2003)

En ambos ensayos se mide dos diámetros perpendiculares y se calcula la media, para obtener el resultado. Este indicará la fluidez de la mezcla, así como su capacidad para rellenar oquedades. En este ensayo también se puede comprobar la presencia de segregación o exudación examinando el grout extendido (Cremades, 2011).

Ensayo V-funnel

Al igual que en el ensayo anterior, existen dos ensayos de idénticas características, variando solo el tamaño del dispositivo a emplear. En ambos casos se introduce la muestra a estudiar en un recipiente prismático en forma de V y se mide el tiempo que tarda en atravesar por completo a través de una pequeña trampilla situada en la parte inferior. Con este ensayo se averigua la capacidad de fluir de una mezcla por una pequeña abertura, así como la posibilidad de existencia de segregación si se produjese un atasco en el embudo (Cremades, 2011).

El ensayo de la versión de 12 litros de capacidad, está descrito en la norma UNE-EN 12350-9:2010 mientras que la versión reducida, el *minifunnel* de tan solo 1,2 litros, es presentada en el trabajo de los investigadores japoneses Okamura y Ouchi (Okamura and Ouchi, 2003).

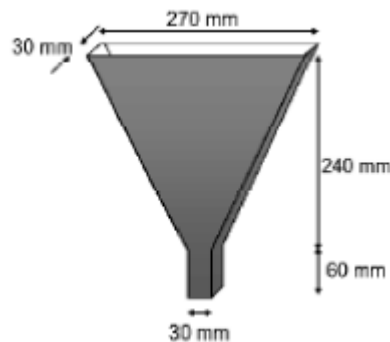


Figura 6. Embudo empleado en el ensayo minifunnel (Okamura and Ouchi, 2003)

Ensayos de reología

La reología es una ciencia englobada dentro de la física, que estudia la deformación y el flujo de materiales sometidos a tensiones. Los fluidos, atendiendo a la complejidad de sus estructuras, pueden clasificarse como fluidos newtonianos, de estructura simple como por ejemplo el agua, o no newtonianos, de estructuras más complejas como puede ser el hormigón (Seara-Paz, 2015).

En 1920, Abrams se dio cuenta de la importancia que tenía la consistencia de un hormigón en fresco en relación con las resistencias en endurecido e introdujo para su análisis, el ensayo del cono que lleva su nombre. La altura del cono de hormigón una vez retirado el molde, o el diámetro del hormigón esparcido, son indicadores de la tensión de flujo umbral de la mezcla (Banfill, 2011).

Los ensayos como el de Abrams, fueron los precursores de la aplicación de la reología al hormigón, que comenzaron en la década de los 70. En ellos se considera a este material como una suspensión en la que los áridos corresponden a la fase sólida, suspendida en el mortero, considerado como la fase líquida (Sheinn, 2007).

El estudio de la trabajabilidad de los grouts mediante la reología proporciona niveles de información que los ensayos, como el cono de Abrams, no son capaces de producir ya que, grouts con distinto comportamiento reológico pueden generar los mismos resultados en un ensayo de cono de Abrams. Esto no quiere decir que el ensayo del cono sea erróneo, sino que el comportamiento de un fluido no se puede definir con un solo parámetro, y, por lo tanto, para un completo estudio y conocimiento de un fluido, es necesario el empleo de estas técnicas (Ferraris and Brower, 2003).

Para describir el flujo del hormigón se puede emplear, en la mayoría de los casos, el modelo Bingham. Este método relaciona linealmente la tensión de corte (*shear stress* (τ)) con el gradiente de velocidades de deformación (*shear rate* ($\dot{\gamma}$)) por medio de dos parámetros: la tensión de flujo umbral (*yield stress* (τ_0)) y la viscosidad plástica (*plastic viscosity* (μ)) (Ferraris and Brower, 2003). Un material sometido a una tensión de corte $\tau < \tau_0$ no será capaz de fluir, pero sometido a una tensión $\tau > \tau_0$ sí (Banfill, 2011).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Ecuación 1. Ecuación modelo Bingham (Banfill, 2011)

Al igual que ocurriría con los ensayos de reología y de escurrimiento, la tensión de flujo umbral y la viscosidad plástica tendrán que ser estudiados en conjunto, puesto que dos grouts distintos pueden presentar la misma tensión de flujo umbral pero distintas viscosidades plásticas (Rial-Gerpe, 2019).

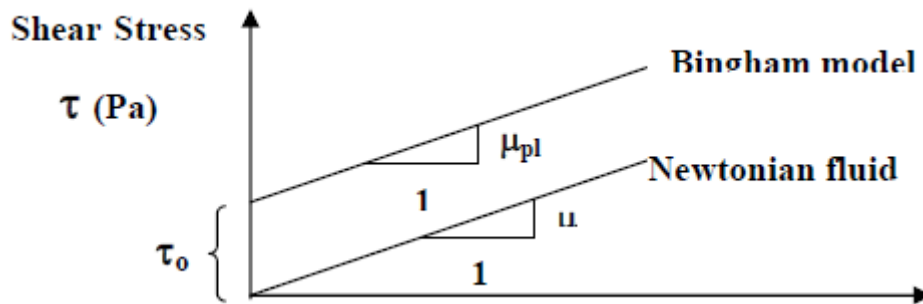


Figura 7. Gráfica del modelo Bingham en comparación con un fluido newtoniano (Sheinn, 2007)

Numerosos factores afectan a la trabajabilidad de los grout: presencia o no de árido grueso, cantidad de agua libre, el ratio arena/pasta, tipo y cantidad de aditivo utilizado o empleo de adiciones (Erdem, Khayat and Yahia, 2009):

- Un mayor contenido de árido grueso, de manera general, eleva la viscosidad de la mezcla debido al aumento de interacciones producidas entre las partículas de la suspensión. Este aumento dependerá a su vez de las características del árido empleado, puesto que un árido de granulometría continua, o con partículas esféricas o más redondeadas, aportará menor viscosidad que un árido de textura más rugosa que presente mayor superficie específica.
- Un mayor contenido de agua genera una disminución de la tensión de flujo umbral y de la viscosidad ya que se aumenta la fase líquida de la suspensión y disminuye la concentración de partículas. Un aumento de la cantidad de cemento ejerce un efecto similar, al aumentar nuevamente la fase líquida de las mezclas.
- Las adiciones, bien sean humo de sílice, escoria de alto horno, ceniza volante o filler calizo aumenta la cantidad de finos de la mezcla lo que produce por un lado un aumento de demanda de agua, y por otro, un aumento de la cantidad de pasta. Dependiendo de a qué sustituyan estas adiciones, y de su forma de partícula y cantidad, se pueden obtener menores viscosidades o, por el contrario, mezclas con peor comportamiento en estado fresco. Las partículas más alargadas como las del filler granítico, proporcionan mayor demanda de agua que, por ejemplo, las partículas cúbicas de filler calizo (Sheinn, 2007).
- Los aditivos superfluidificantes son polímeros solubles en agua que facilitan la dispersión de las partículas sólidas disminuyendo así la tensión de flujo de la mezcla. Los aireantes generan también un efecto parecido, siendo en este caso las burbujas de aire las causantes de la disminución de fricción entre partículas (Banfill, 2011).

Los aparatos empleados para medir los parámetros reológicos se denominan reómetros. Estos dispositivos registran el torque necesario para hacer girar una pala dentro de la muestra a una velocidad dada, con los que luego se pueden obtener la tensión de flujo umbral y la viscosidad plástica.

2.6.3. Caracterización del grout en estado endurecido

Una vez caracterizado el grout en su estado fresco, se deberá analizar su comportamiento en estado endurecido centrándose en dos aspectos fundamentales: la resistencia a compresión y la retracción. La primera será necesaria para averiguar si cumple con los requisitos mínimos fijados por el Eurocódigo 6, Proyectos de estructura de fábrica (AENOR, 2013), y el documento básico del CTE (Código Técnico de la Edificación) Seguridad estructural: Fábrica (Ministerio de Fomento, 2009). La medida de la retracción servirá como indicativo del comportamiento de la mezcla una vez dentro del bloque de hormigón.

Resistencias mecánicas

La poca literatura existente sobre hormigones realizados con filler de recuperación, coincide en que la incorporación de este residuo provoca un descenso en las resistencias a compresión (Esquinas *et al.*, 2017)(Martín *et al.*, 2013). Habrá que tener en cuenta si esta reducción es lo suficientemente reducida como para que los grouts elaborados sigan cumpliendo los requisitos mínimos de resistencia.

Los requisitos de resistencia mínima a compresión vienen recogidos en el Eurocódigo 6 Proyectos de estructura de fábrica (AENOR, 2013), en el que se indica que como mínimo la resistencia a compresión medida en probetas cúbicas ha de ser de 15 MPa y en probetas cilíndricas de 12 MPa. Sin embargo, el estudio realizado en (Martins *et al.*, 2018a) muestra como los grouts de 15 MPa de resistencia a compresión presentan un comportamiento inferior frente al proceso de carbonatación que los grouts de 20 MPa y 25 MPa estudiados. De hecho, aun cumpliendo los requisitos de espesores mínimos, su grout de resistencia a compresión de 15 MPa, solo alcanza 20 años de vida útil para la armadura. La corroboración de estos datos indicaría que la resistencia mínima indicada en la norma podría no ser suficiente en caso de utilizarse este sistema de relleno de mampostería con armadura, como elemento estructural.

Hay que tener en cuenta, que a la hora de medir la resistencia a compresión del grout, al igual que no es lo mismo los resultados obtenidos por una probeta cúbica que por una cilíndrica, tampoco lo es los resultados obtenidos por una probeta realizada en un molde metálico, que los obtenidos por el mismo material confinado en un medio absorbente, como puede ser el bloque de hormigón. El contenido de agua de los grouts realizados en moldes metálicos será mayor y por lo tanto las resistencias medidas en ellos serán menores que las obtenidas por el grout confinado dentro del bloque (Fonseca *et al.*, 2019).

Es por ello que la normativa americana especifica un método para la elaboración de las probetas de ensayo con el que paliar este efecto. En la norma ASTM 1019, se especifica que, en lugar de

emplear moldes metálicos estándar, se empleen las caras exteriores de los propios bloques de hormigón como moldes para realizar las probetas, como se muestra en [Fig. 8]. De esta manera se simula el medio absorbente en el que el grout será colocado y se obtendrán valores de resistencia que se ajustarán con mayor fidelidad a la realidad. Debido a que las resistencias obtenidas por este método son mayores, en este proyecto no se utilizará este proceso para el cálculo de las mismas y se seguirán las pautas marcadas por la normativa europea.

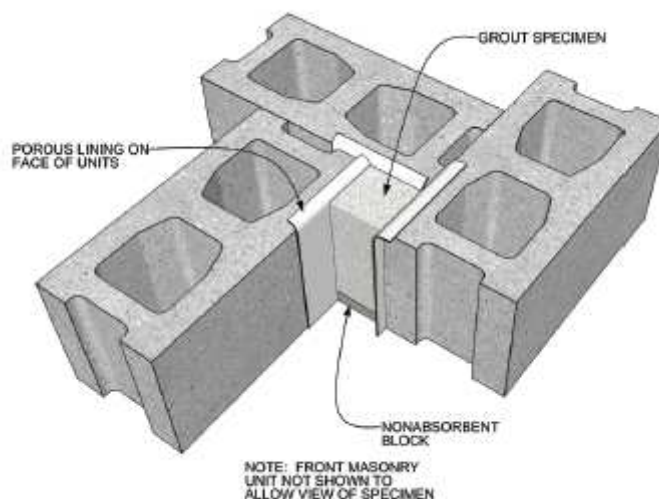


Figura 8. Colocación de bloques de hormigón como encofrado para la realización de probetas. ASTM 1019

Ensayo de retracción

La retracción consiste en una deformación volumétrica de contracción producida en el grout sin estar actuando sobre él ninguna carga ni variación de temperatura (Kurda, Brito and Silvestre, 2019). Es debida principalmente al intercambio de humedad producido entre el material y el ambiente en el que se encuentre.

Existen principalmente dos tipos de retracción: autógena y por secado.

La retracción autógena es un proceso químico producido a causa de la hidratación del cemento y demás componentes del grout, sin tener en cuenta las pérdidas de agua. Salvo para casos en los que los grouts sean de altas resistencias, este tipo de retracción suele ser inferior a la retracción por secado, por lo que suele despreciarse (Rial-Gerpe, 2019).

La retracción por secado se trata de un proceso complejo en el que aglutinan varios procesos. A medida que el material se va secando, va intercambiando humedad con el ambiente que lo rodea, produciéndose un gradiente de humedad dentro del propio material resultando más seca la parte exterior que la interior. Este secado produce una reducción volumétrica de la pasta de cemento, lo que provoca la aparición de fisuras por las que la humedad interior puede escapar con mayor facilidad cambiando el gradiente inicial (Idiart, Lopez and Carol, 2006). La cantidad o tipo de árido, cantidad de agua, o empleo de aditivos modificadores de la trabajabilidad afectan de manera directa a este tipo de retracción.

Debido a que los grouts aquí estudiados serán confinados en un medio absorbente como son los bloques de hormigón, la retracción autógena será despreciable en comparación con la de secado y es por ello que se decide estudiar solo el comportamiento de la segunda.

2.7. Bloques de hormigón

2.7.1. Introducción

Antiguamente los principales materiales que se empleaban en la albañilería eran la piedra natural y el ladrillo cerámico artificial. No fue hasta el siglo XX, cuando apareció el bloque de hormigón, un nuevo elemento de mayores dimensiones y mejores capacidades portantes. Con el paso de los años, estos bloques fueron mejorando su proceso productivo obteniendo cada vez un producto de mejor calidad, tanto en acabados como en resistencias (NORMABLOC, 2008).

La construcción con bloques se está volviendo cada vez más frecuente, sobre todo en países del continente americano, debido a la simpleza de su ejecución. En este tipo de sistemas constructivos, las cargas son transmitidas a las cimientos a través de los bloques, rellenos o no, y sus juntas de mortero (Martins, *et al.*, 2018).

Aún en vista de la creciente demanda y de la existencia de numerosos estudios en los que se ensayan tanto bloques sin relleno, como rellenos con grout, sigue habiendo discrepancias e incertidumbres sobre el comportamiento del conjunto, que en ocasiones llegan a limitar su propio uso (Camacho *et al.*, 2015). Esto se debe al abanico de variables que afectan al proceso constructivo que van desde la calidad proporcionada por los obreros durante el montaje, condiciones climáticas y de curado, hasta las propiedades físicas y mecánicas de los elementos constituyentes del sistema, y la interacción entre ellas (Martins, *et al.*, 2018).

2.7.2. Ventajas del uso de los bloques en la construcción

El uso de bloques de hormigón en la edificación ofrece numerosas ventajas (Fonseca, Godfrey and Siggard, 2015):

- El hormigón es un material con una elevada vida útil. A esto hay que sumar las ventajas y controles que un proceso de prefabricación, como el de los bloques, otorga a este tipo de elementos, consiguiendo unidades con una vida útil superior a la necesaria en construcción.
- El proceso prefabricación permite, además, que se mantenga un nivel de control y calidad en cada una de las unidades, a un bajo coste, tanto económico como energético.
- Los bloques de hormigón requieren un mantenimiento mínimo, considerado despreciable al tener en cuenta la vida útil de los mismos.
- Alta tasa de reciclabilidad, pudiendo ser utilizado como árido reciclado para la elaboración de otros hormigones o elementos prefabricados realizados de este material.

- Proporciona una elevada inercia térmica, sobre todo si se rellena con grouts. Esta inercia reducirá la demanda energética de la construcción, reduciendo así la huella de carbono, del conjunto de la edificación.
- Posee una elevada resistencia al fuego, aumentando así la seguridad de las personas y bienes que hagan uso de la edificación.
- Proporciona un aislamiento acústico suficiente, reduciendo el consumo de otros materiales aislantes.

Además de estas ventajas, el sistema constructivo puede aumentar su sostenibilidad si se introducen tanto en la fabricación de los bloques como del grout de relleno, nuevos materiales que reduzcan el contenido de cemento portland o que simplemente sean residuos o subproductos de otros sectores (Fonseca, Watterson and Siggard, 2016).

En el estudio de Fonseca y asociados (2016), se analiza el comportamiento de prismas (conjunto de mínimo 2 bloques de hormigón unidos por una capa de mortero de 1cm de espesor) rellenos con grouts realizados con distintas concentraciones de ceniza volante y escoria de alto horno. Los resultados que obtuvieron muestran como incluso los prismas realizados con el mayor porcentaje de sustitución probado, 65% de ceniza volante o 85% de sustitución conjunto del cemento por un 20% de ceniza volante y un 65% de escoria de alto horno, cumplían con la compresión mínima fijada de 10,34 MPa. Con estos resultados los investigadores proponen incrementar los mínimos legales de aportación de ceniza volante del 40% actual establecido en la normativa americana correspondiente, al 65% y de la combinación de ceniza y escoria de alto horno, pasar del 70% actual al 85%.

Una de las limitaciones del sistema de construcción con bloques era el número de plantas que se podía conseguir, debido a que el sistema no era capaz de soportar cargas elevadas y se generaban muros de gran espesor en las bases. Sin embargo, hoy en día existen bloques capaces de alcanzar 35 MPa sin necesidad de relleno. A esto hay que añadir que, las nuevas investigaciones tanto en rellenos de grout como en armaduras para este tipo de muros, ha hecho posible la construcción de edificios de alturas relativamente altas en zonas de gran actividad sísmica, como puede ser el Hotel Hilton en Pasadena, California (Estados Unidos) o el hotel Excalibur situado en Nevada (Estados Unidos). En Brasil, este sistema también está siendo ampliamente utilizado, contando con numerosos edificios creados de 15-20 plantas en la región de San Paulo (Fonseca *et al.*, 2019).

2.7.3. Tipos de bloques

Aunque existen ciertos modelos de bloques convencionales que se repiten, la mayoría de los fabricantes posee su propia línea de bloques, obteniendo en el mercado una gran oferta con la que poder satisfacer casi cualquier necesidad que se plantee.

Bloques de hormigón huecos

Los bloques más habituales son los de hormigón huecos de áridos densos de 40x20x20 cm con dos perforaciones situadas en la cara de apoyo de los mismos. Se pueden también encontrar modelos con la misma configuración pero distintas dimensiones, así como modelos con tres perforaciones, modelos con caras lisas para elementos de terminación, esquinas, pilastras, piezas en L etc. (NORMABLOC, 2007).

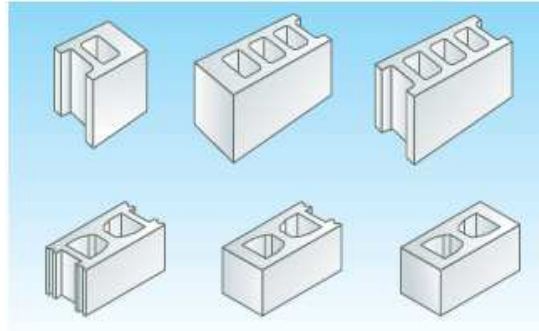


Figura 9. Ejemplos de bloques de hormigón huecos (NORMABLOC, 2007)

Bloques de hormigón universal

Se trata de bloques que presentan en al menos una de sus caras, un plano de debilitamiento de rotura controlada, para facilitar la apertura por parte de un albañil sin afectar a la geometría de la pieza.

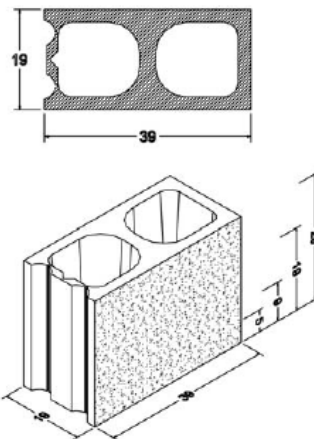


Figura 10. Bloque universal (NORMABLOC, 2008)

Bloques de áridos ligeros

Se trata de bloques cuya densidad suele estar por debajo de los 1,700 kg/m³, que cuentan con múltiples cámaras y dimensiones de mayor tamaño debido a su ligereza.

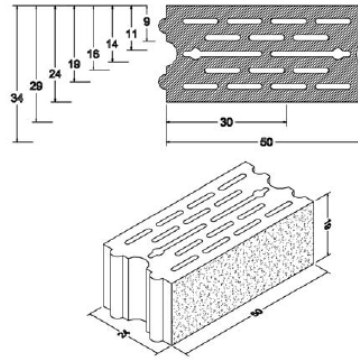


Figura 11. Ejemplo de bloque de áridos ligeros Arliblock macizo (NORMABLOC, 2008)

Bloques cara vista

En este apartado encontramos una gran variedad de opciones, desde acabados lisos o *Split*, hasta la adición de pigmentos para obtener distintos colores de acabado. A continuación, se muestran ejemplos obtenidos del catálogo comercial de la empresa Prefhorvisa, a modo de ilustración de la variedad presente en el mercado:



Figura 12. Ejemplo de bloque de acabado liso (izda) y acabado split (dcha). Fuente <https://prefhorvisa.wordpress.com/descargas/>



Figura 13. Ejemplos de colores disponibles en el catálogo de Prefhorvisa. Fuente: <https://prefhorvisa.wordpress.com/descargas/>

2.7.4. Resistencia a compresión de bloques rellenos frente a bloques vacíos

En la literatura revisada, se encuentran ejemplos de estudios relativamente antiguos en los que ya se comenzaba a discutir el problema del comportamiento de los bloques y de su unión con el grout. En el estudio presentado por Drysdale y Hamid (1979) se ensayan numerosos prismas para comprobar la idea de si la resistencia total del conjunto equivalía a la suma de la resistencia

de los bloques más la del grout. Sus resultados no solo desmintieron esa suposición si no que las resistencias a compresión obtenidas en los prismas rellenos con grout resultaron ser inferiores a las obtenidas por los prismas huecos. Los autores afirmaban que se debía a que la presencia del grout incrementaba las tensiones laterales sufridas por las paredes del bloque, y esto hacía que se fracturase antes que en el caso de los bloques vacíos. Los autores sugirieron que se debería buscar una combinación en la que tanto las deformaciones del grout como del bloque fuesen similares para poder mejorar los resultados.

En el trabajo de Atkinson y Kingsley (1985) se quería comprobar la diferencia de comportamientos entre la mampostería de hormigón y la cerámica, pero, junto con esos ensayos, se repitieron las mismas pruebas que en el ensayo de Drysdale y Hamid (1979) obteniendo resultados contradictorios. En este caso, los prismas rellenos con grout obtuvieron mejor resultado que los prismas vacíos, mejorando la resistencia de los bloques hasta un 130% de la misma. Los investigadores postulan que el mecanismo de rotura de los prismas es un proceso complejo que implica tanto la deformabilidad del bloque, como del grout y del mortero que los une. En su caso, el grout utilizado tenía una resistencia a compresión un 36% más alta que la del bloque, contenía superplastificantes y agentes expansivos, y fue vibrado mecánicamente después de su colocación. Esta combinación hizo que se adhiriera a las paredes internas del bloque y se comportase el conjunto de manera homogénea, dando como resultado ese incremento en las resistencias a compresión medidas. Además, se usó un mortero de unión de resistencias similares a las del bloque y, como se muestra en la investigación de los investigadores Mohamed y asociados (2017) si las resistencias a compresión de mortero y bloque coinciden, las deformaciones tienen a ser similares, mejorando así el comportamiento del conjunto.

Estos resultados positivos sobre el aumento de la resistencia de los prismas rellenos de grout se encuentran en numerosas investigaciones, como por ejemplo en el trabajo de Huang y asociados (2014) en el que se estudia el efecto que ejerce en la resistencia a compresión el rellenar o no los bloques de sus prismas. En este caso, los bloques utilizados fueron del tipo doble H y concluyeron que las resistencias a compresión de los prismas huecos calculadas con el área neta eran superiores a las resistencias de los prismas rellenos calculando éstas con el área bruta. La carga máxima resistida, sin embargo, era mucho mayor en el caso de los prismas rellenos. Sus resultados también apuntan a que la relación entre la resistencia del grout y la del prisma resultante dista mucho de ser lineal, puesto que con un incremento del 42,3% en la resistencia del grout, tan solo obtuvieron una mejora en el prisma de 5,9%. Estos resultados concuerda con los mostrados en (Camacho *et al.*, 2015) cuyos experimentos afirman un incremento de resistencias en los prismas rellenos de grout en comparación con los huecos, pero sin mostrar variaciones significativas si se incrementaba la resistencia del grout.

Resultados similares pueden observarse en el trabajo de Martins y asociados (2018) en el que además de verificar que las resistencias de los prismas rellenos de grout eran superiores a la de los prismas huecos, comprobaron mediante el uso de bloques con distintas resistencias, como el incremento de la resistencia del bloque siempre derivaba en un incremento de la resistencia de los prismas, bien fuesen rellenos o huecos. Por el contrario, incrementar la resistencia del grout no siempre obtenía el mismo resultado en los prismas. Los investigadores apuntan que

usar un grout con resistencias iguales a las del bloque vacío calculadas con su área neta, era la combinación que mejores resultados obtuvo.

En (Camacho *et al.*, 2015) los prismas realizados con bloques convencionales dieron cifras parecidas tanto para los rellenos como para los huecos. Sin embargo, cuando probaron con bloques de paredes más gruesas, los bloques rellenos obtuvieron un incremento de resistencia del 50%. Esto se debe a que el aumento del grosor de las paredes genera dos efectos positivos: por un lado, aumenta la resistencia del bloque frente a los esfuerzos laterales inducidos por el grout, y, por otro, reduce la cantidad de grout, reduciendo por tanto el empuje de este sobre las paredes del bloque.

La relación entre la resistencia a compresión del prisma y la resistencia del bloque es conocida como la eficiencia de la mampostería y, a diferencia de lo que esperaban los investigadores Fonseca y asociados. (2019), la eficiencia de los prismas rellenos con grout en sus ensayos resultó ser un 10% inferior a la de los prismas huecos. Esta diferencia se acentúa aún más para los prismas realizados con bloques de altas resistencias, en la que la eficiencia de los prismas rellenos con grout baja un 25%.

Queriendo comprobar la eficiencia del conjunto de bloques de alta resistencia y grouts con distintas concentraciones de aditivo reductor de retracción, en el estudio de los investigadores Fonseca *et al.* (Fonseca *et al.*, 2019) se realizaron ensayos de resistencia a compresión a prismas elaborados con bloques de 41, 59 y 75 MPa y grouts de 35, 41 y 47 MPa respectivamente. Los resultados volvieron a mostrar la complejidad del estudio de estos sistemas de rotura, obteniendo peores resultados los prismas realizados con bloques de altas resistencias, que los realizados con bloques de resistencias medias. Además, las series de prismas realizadas con bloques rellenos de grouts sin el aditivo reductor de retracción, dieron peores resultados que las series de prismas huecos. Las series con un 2% de ese aditivo sí que mostraron mejoría frente a los prismas huecos, pero mucho menor a lo esperado por los investigadores.

2.7.5. Resistencia a cortante de bloques rellenos frente a bloques vacíos

La mayor parte de la literatura revisada se centra en el cálculo de la resistencia a compresión, puesto que ésta será la misión principal a cumplir por las estructuras de bloques de hormigón. No obstante, en ciertos muros o incluso vigas, también es interesante conocer el comportamiento de los bloques frente a esfuerzos cortantes. Para ello, los investigadores Hamid y asociados (2013) realizaron ensayos de cortante sobre la unión de mortero y ensayos de tensión diagonal.

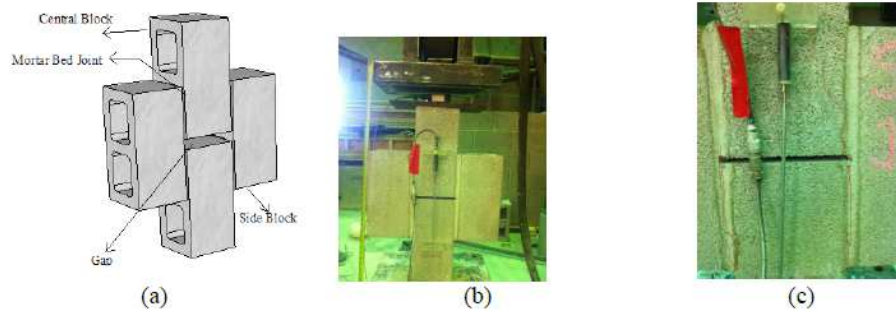


Figura 14. Ensayo de cortante sobre las uniones de mortero (Hamid, Bolhassani and Moon, 2013).

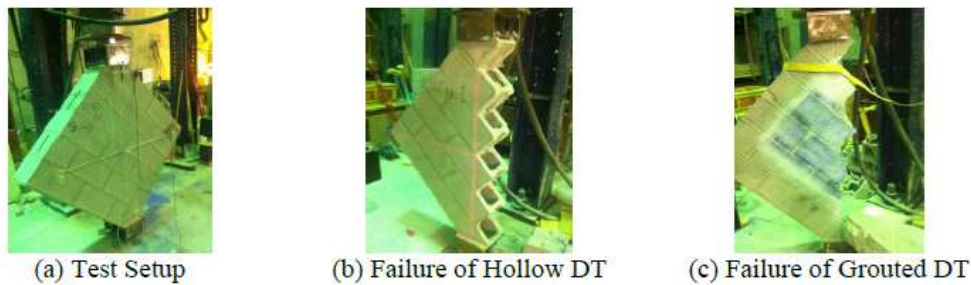


Figura 15. Ensayo de tensión diagonal (Hamid, Bolhassani and Moon, 2013).

En el ensayo sobre las uniones de mortero se obtuvieron mejoras del 280% en los bloques rellenos con grout frente a los bloques vacíos mientras que, en el ensayo de tensión diagonal, los rellenos obtuvieron una mejora del 168%. Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión siguieron en la misma línea favoreciendo a los bloques rellenos, pero en menor magnitud, obteniendo un 38% de mejora frente a los huecos.

2.7.6. Otras estructuras realizadas con bloques de hormigón

Aunque el principal uso de los bloques de hormigón es la realización de muros, los bloques también pueden ser empleado para la construcción de vigas. En la publicación (Zohreh, Das and Banting, 2017) se estudia el comportamiento de vigas realizadas con bloques de hormigón, tanto en *running bond* como en *stack pattern* [Fig 16] y observaron como el factor que más contribuía a un aumento de la resistencia del conjunto, era precisamente la resistencia del grout. No obstante, las mejoras vistas en la viga eran notablemente inferiores a los incrementos de resistencia en el grout, ya que, con aumentos de resistencia del 197% en grout, conseguían mejoras en las vigas del 34%.

En cuanto al estilo de colocación de los bloques, apenas hubo diferencia con respecto a la carga máxima soportada, obteniendo resultados ligeramente superiores el *stack pattern*, a diferencia de lo que se podría esperar.



Figura 16. Estilos de colocación. Running bond (izda) y stack pattern (dcha) (Zohreh, Das and Banting, 2017).

2.8. Marco normativo

En España no se cuenta con un amplio marco normativo en cuanto a grouts de relleno de bloques de hormigón se refiere, tan solo leves menciones en el Código Técnico de la Edificación y en el Eurocódigo 6. Sin embargo, otros países, sobre todo en el continente americano, sí que cuentan con normativa específica y métodos de ensayo diseñados para ensayar este tipo de hormigones. A continuación, se presentan las más relevantes.

2.8.1. Normativa europea y española

- UNE-EN 1996-1-1:2011+A1:2013, “Eurocódigo 6: Proyectos de estructura de fábrica. Parte 1-1 Reglas generales para estructura de fábrica armada y sin armar”. En esta norma se ofrece una breve definición, los valores mínimos de resistencia a compresión y de escurrimiento que deben tener y tamaño máximo de árido en función del tamaño del hueco de la fábrica a rellenar.
- Documento Básico SE-F: Seguridad Estructural: Fábrica. En este documento del Código Técnico de la Edificación, se muestra un valor de resistencia mínima de compresión, ligeramente superior al mencionado en el Eurocódigo, y mismos valores para el tamaño máximo de árido.
- UNE-EN 772-1:2011+A1:2016, “Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.” En esta norma se especifican las condiciones previas en las que los bloques de hormigón, rellenos o vacíos han de encontrarse antes de la realización del ensayo a compresión, así como las condiciones relativas al propio ensayo.

2.8.2. Normativa americana

- ASTM C476, “Standard Specification for Grout for Masonry”. En esta norma se establecen unas recomendaciones de dosificaciones de alto contenido en cemento con las que obtener resistencias por encima de los mínimos fijados.
- ASTM C143, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete”. Descripción del ensayo de asentamiento para grouts que contengan en su dosificación árido grueso.
- ASTM C109, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”. Descripción del ensayo de asentamiento para los grouts elaborados con áridos finos.

- ASTM C1019 “*Standard Test Method for Sampling and Testing Grout*”. En esta norma se especifica como realizar las probetas para los ensayos de resistencia a compresión, tiempo y tipo de curado y como descripción del ensayo de resistencia a compresión.
- ASTM C1314 “*Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms*”. En esta norma se especifica como preparar los prismas para ser ensayados, incluyendo espesor de capa de mortero entre los dos bloques de hormigón, como y cuando realizar el relleno de los mismos, método de curado y especificaciones referentes a las máquinas y platos utilizados para la realización del ensayo a compresión.

2.9. Conclusiones y objetivos específicos

2.9.1. Conclusiones

Tras el análisis de la bibliografía existente, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- A diferencia de los fillers de aportación, el filler de recuperación posee características y propiedades desconocidas *a priori* que deberán ser analizadas para realizar su correcta dosificación dentro de las mezclas de base cemento.
- La incorporación de filler de recuperación a estas mezclas provoca una disminución de la trabajabilidad, produciendo consistencias más secas que dificultan su puesta en obra si no se contrarresta con algún aditivo. Además, disminuye las resistencias a compresión y disminuye la durabilidad, tanto en carbonatación como en penetración de sulfatos debido a un aumento de porosidad.
- La incorporación de árido reciclado provoca resultados similares, reduciendo tanto la trabajabilidad como las resistencias a compresión debido al alto contenido de finos y a la elevada absorción que estos áridos poseen.
- Los grouts de relleno de bloques de hormigón proporcionan una mejora general de las características a estas piezas. Se consigue un aumento de las resistencias a compresión, aislamiento acústico, resistencia al fuego y resistencia a impactos. Sin embargo, la relación entre bloque y grout es compleja y no siempre un aumento de las características de uno de los componentes deriva en una mejora del conjunto. En cuanto a las resistencias a compresión, una mayor deformación del grout puede generar tensiones laterales sobre las paredes del bloque que produzcan una rotura prematura del sistema, por lo que será necesario analizar el comportamiento de ambos materiales a medida que se incrementa la carga aplicada.

2.9.2. Objetivos específicos

Tras la revisión bibliográfica y en el marco del objetivo general del trabajo (analizar la influencia que produce la sustitución del filler calizo por filler de recuperación y su comportamiento conjunto con árido reciclado, en grouts de relleno para bloques de hormigón) se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar las propiedades de los filler de recuperación evaluando sus posibilidades en el campo de los hormigones para relleno de bloque prefabricado de hormigón.
- Diseñar los grouts de relleno incorporando diferentes porcentajes de filler de recuperación y árido reciclado.
- Evaluar el comportamiento conjunto del filler de recuperación y el árido reciclado en los grouts diseñados:
 - Analizar su comportamiento en fresco utilizando métodos convencionales y ensayos reológicos.
 - Analizar su comportamiento en estado endurecido mediante medida de resistencias y propiedades deformacionales (módulo de elasticidad y retracción).
- Estudiar las posibilidades de utilización del grout en diferentes bloques de hormigón analizando el comportamiento conjunto bloque-grout mediante ensayos de resistencia y tipos de rotura de la solución conjunta.

3.CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LA FASE I

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LA FASE I

3.1. Criterios de selección

Para la elaboración de la fase experimental se realizó, en primer lugar, una caracterización de los distintos materiales a emplear, comprobando su idoneidad para la realización de los grouts previstos. Puesto que este trabajo se engloba dentro del proyecto “*Alfiller*” en el que participan varias empresas, como ya se indicó en la introducción, la elección de los materiales de uso viene dada tanto por las propias empresas como por la experiencia del personal investigador adscrito al proyecto.

Los materiales usados para la primera fase pueden dividirse en dos grupos, dependiendo de su procedencia:

- Materiales convencionales:
 - Cemento
 - Agua
 - Arena natural
 - Filler calizo
 - Superplastificante
- Materiales reciclados:
 - Árido reciclado
 - Filler de recuperación

A continuación, se indican los ensayos realizados a cada uno de ellos, así como sus principales propiedades.

3.2. Cemento

El cemento utilizado es un CEM II A-V 42,5R suministrado a granel por la empresa Cosmos del grupo Votorantim cimentos, indicado para la fabricación tanto de morteros como de todo tipo de hormigones.

Composición		
	Norma	Valor habitual
Clinker	80-94%	≥ 80%
Caliza	6-20%	≤ 20%
Minoritarios	0-5%	≤ 5%
Exigencias químicas		
	Norma	Valor habitual
Sulfato (SO₃)	≤ 4,0 %	< 4,0 %
Cloruros	≤ 0,1 %	< 0,05 %
Cromo VI soluble en agua	≤ 0,0002 %	< 0,0002%
Exigencias físicas		
	Norma	Valor habitual
Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm	< 2,5mm
Tiempo de fraguado		
-Principio	≥ 60 min	> 75 min
-Final	≤ 720 min	< 340 min
Exigencias mecánicas		
	Norma	Valor Habitual
Resistencia a compresión		
-2 días	≥ 20,0 MPa	> 25,0 MPa
-28 días	≥ 42,5 MPa	< 62,5 MPa

Tabla 1. Características cemento CEM II A-V 42,5 R (Elaboración propia a partir de ficha técnica)

3.3. Agua

El agua empleada para la realización tanto de los grouts como de los distintos morteros diseñados en este proyecto es agua potable obtenida del laboratorio de construcción de la Escuela Técnica Superior de Caminos Canales y Puertos. Cumple con las indicaciones de la EHE-08 (CPH, 2011).

3.4. Arena natural

Se realizaron ensayos de granulometría, densidad y absorción a las dos posibles arenas disponibles para su uso en el proyecto, con el fin de averiguar cuál de ellas se aproximaba más a la granulometría del árido reciclado. La arena 1, procede de la cantera Mezalocha, situada en

Zaragoza y se trata de una arena natural 0/4, mientras que la arena 2, suministrada por Construcciones López Cao, es una arena natural 0/2.

Para el ensayo de granulometría se siguió el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 933-1:2012 (AENOR, 2012) obteniendo los siguientes resultados de porcentaje de pasa acumulado:

	Arena 1	Arena 2
Tamaño	0/4	0/2
Tamiz 8mm	100%	100%
Tamiz 4mm	93,93%	100%
Tamiz 2mm	47,72%	94,82%
Tamiz 1mm	23,35%	65,19%
Tamiz 0,5mm	11,85%	42,10%
Tamiz 0,25mm	5,64%	26,10%
Tamiz 0,125mm	2,21%	13,27%
Tamiz 0,063mm	0,08%	3,77%

Tabla 2. Porcentaje pasa acumulado de las arenas 1 y 2

Las curvas granulométricas de ambas arenas pueden verse en la gráfica siguiente:

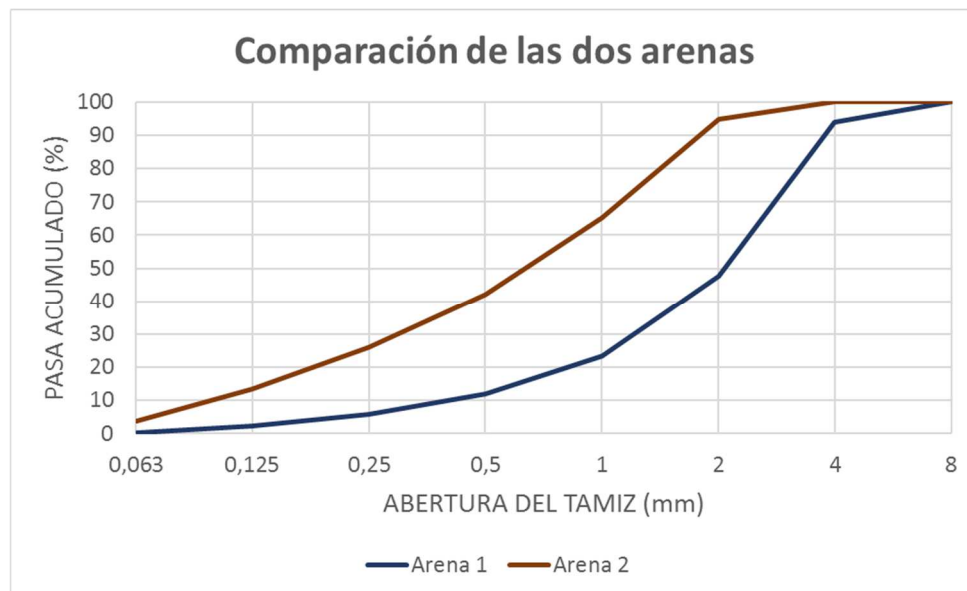


Figura 17: Comparación de la granulometría de la Arena 1 y la Arena 2

A continuación, se realizaron ensayos de densidad y absorción a las dos arenas según la norma UNE-EN 1097:6-2014 (AENOR, 2014a), obteniendo los siguientes valores:

- Densidad aparente de partículas (ρ_a): relación entre la masa de muestra de árido secada en estufa y el volumen que ocupa en agua, incluyendo el valor de cualquier hueco interno sellado, pero excluyendo el volumen de cualquier hueco accesible al agua.
- Densidad de partículas secadas en estufa (ρ_{rd}): relación entre la masa de muestra de árido secada en estufa y el volumen que ocupa en agua, incluyendo el valor de cualquier hueco interno sellado y el volumen de cualquier hueco accesible al agua.
- Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente (ρ_{ssd}): relación entre la suma de la masa secada en estufa de la muestra de árido y la masa de agua presente en

cualquier hueco accesible, entre el volumen que ocupa en agua, incluyendo el volumen de cualquier hueco interno sellado y el volumen de cualquier hueco accesible al agua.

- Absorción (**WA24**): absorción máxima de agua tras inmersión de 24h.

	Arena 1	Arena 2
Densidad aparente (g/cm ³)	2,64	2,70
Densidad de partículas sec en estufa (g/cm ³)	2,50	2,67
Densidad saturada super. Seca (g/cm ³)	2,55	2,69
Absorción a 24h (%)	2,16 %	0,35 %

Tabla 3. Densidades y absorción de la arena 1 y arena 2

3.5. Superplastificante

Como aditivo superplastificante se utilizó el MasterEase 3530 de la empresa BASF. Este tipo de aditivos sirven para mejorar las propiedades reológicas de la mezcla, generando menores viscosidades sin la necesidad de añadir más contenido de agua.

El fabricante recomienda una dosificación de entre un 0,5 y un 2% sobre la masa de cemento. En este caso, se opta por utilizar la menor relación posible, empleando el 0,5%.

Densidad a 20 °C	1,06 g/cm ³
pH a 20 °C	5,5
Viscosidad Brookfield a 20 °C Sp00/100rpm	< 60cps
Cloruros	< 0,1%

Tabla 4. Propiedades del superplastificante MasterEase 3530 (Elaboración propia a partir de ficha técnica).

3.6. Filler calizo

Se emplea el filler calizo comercializado por la empresa Hormigones Pamplona S.A. en sacos de 25kg, diseñado especialmente para la fabricación de hormigones, morteros o mezclas bituminosas. Este filler está compuesto principalmente de carbonato cálcico en polvo con presencia de óxido de calcio y dióxido de silicio en una proporción mucho menor.



Figura 18. Muestra filler calizo

En el punto siguiente, *Filler de recuperación*, se profundiza con mayor detalle en el comportamiento y composición de ambos fillers, mediante un análisis comparativo.

3.7. Filler de recuperación

Este material procede del cribado y secado de los áridos para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Ha sido proporcionado por la planta de fabricación que la empresa Extraco posee en Allariz (Ourense).



Figura 19. Muestra de filler de recuperación

La primera característica que necesita ser analizada es su granulometría, puesto que, en función de ésta, se podrá determinar el tamaño de partículas, característica relacionada directamente con la trabajabilidad de los hormigones y morteros creados con este filler.

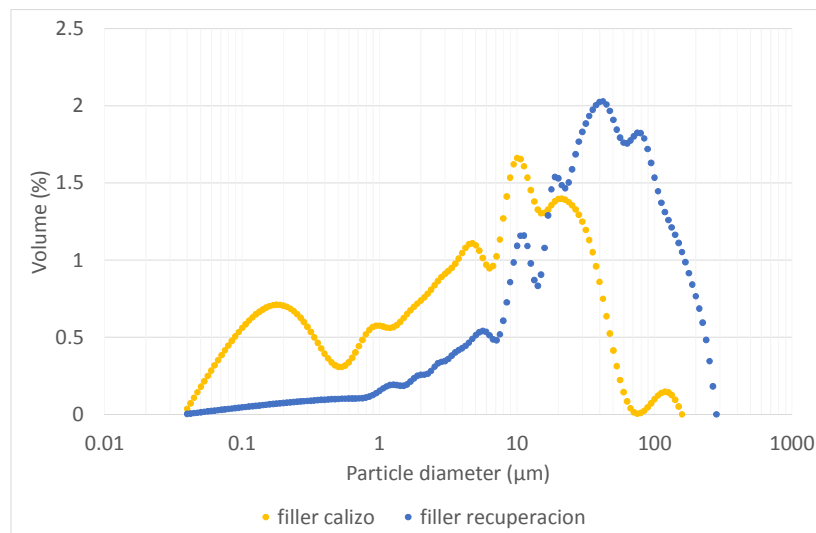


Figura 20: Comparación entre granulometría del filler calizo y del filler de recuperación

Como puede observarse, el filler de recuperación presenta partículas de mayor tamaño que el filler calizo comercial. Tan solo el 89% pasa por el tamiz de 0,125mm frente al 99,6% del calizo. En cuanto al tamiz de 0,036, la diferencia con el filler calizo se acentúa aún más pasando solo el 70% de las partículas, frente al 98,8% del calizo. Estos resultados corroboran lo observado en las microfotografías tomadas en muestras de ambos materiales, en las que además de un mayor

tamaño de partículas, se aprecia una mayor angulosidad generada por la forma de obtención de este residuo.

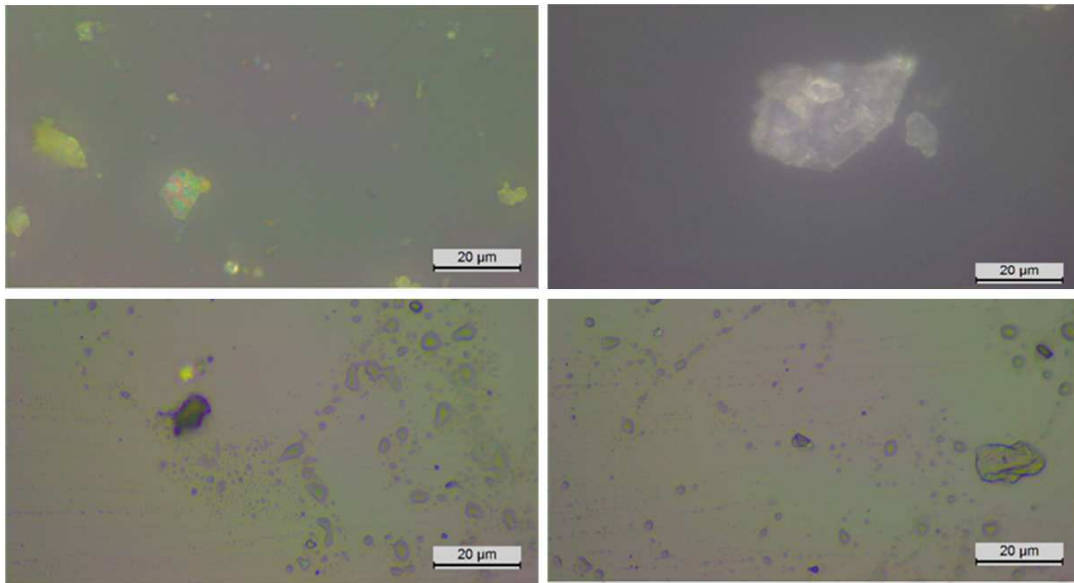


Figura 21. Filler de recuperación (imágenes superiores) y filler calizo (imágenes inferiores)

A pesar de las diferencias detectadas, este filler de recuperación cumple los requisitos marcados por la EHE-08 (CPH, 2011), teniendo la totalidad de sus partículas tamaño inferior a 2mm, al menos el 85% inferior a 0,125mm y al menos el 70% inferior a 0,063mm.

3.7.1. Densidad

La densidad fue medida de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 1097-7:2009. Los resultados muestran como el filler de recuperación presenta unos valores medios ligeramente superiores al del calizo, pasando de $2,6 \text{ g/cm}^3$ a $2,8 \text{ g/cm}^3$. Estos datos se aproximan a los obtenidos en los experimentos de Castillo-Mingorance y asociados (2018) cuyo filler de recuperación obtuvo $2,81 \text{ g/cm}^3$ y los obtenidos por Esquinas y asociados (2017) de $2,88 \text{ g/cm}^3$.

3.7.2. Superficie específica y porosimetría

Para conocer la superficie específica se utilizó la técnica de la adsorción del nitrógeno. No es una técnica habitual en el ámbito de la ingeniería civil sin embargo su uso para la determinación de superficie específica está bastante extendido en numerosos materiales como cerámicos, pigmentos, catalizadores etc. Este proceso de fisorción del nitrógeno utiliza las leyes de la termodinámica para determinar tanto la superficie específica como la distribución y tamaño de poros basándose en la adsorción del nitrógeno a 77K.

Los resultados muestran una mayor superficie específica para el caso del filler de recuperación, con $3,7 \text{ m}^2/\text{g}$ frente a los $1,5 \text{ m}^2/\text{g}$ del filler calizo cuantificado de acuerdo con la medida BET. Si

se considera la teoría Langmuir se pasa a 21,8 m²/g para el filler de recuperación y 5,11 m²/g para el calizo.

Otros investigadores realizaron el mismo análisis de superficie específica BET pero obteniendo variaciones significativas en comparación. Mientras que en el trabajo (Castillo-Mingorance *et al.*, 2018) obtuvieron una superficie específica de 3,187 m²/g, en el trabajo de Esquinas y asociados (2017) su filler de recuperación alcanzó los 76,04 m²/g. Estas grandes diferencias se deben a la procedencia de los áridos de los que es obtenido el filler.

Los resultados de superficie específica, sumados a la mayor cantidad de poros (y de mayor tamaño) observados en el filler de recuperación, hacen prever que las mezclas que lleven este residuo necesitarán mayor cantidad de agua para conseguir valores de trabajabilidad similares a los obtenidos si se emplease filler calizo. Esto se debe a que cuanto más alta sea la superficie específica y la porosidad, mayor es la cantidad de agua necesaria para envolver por completo la partícula lo que reduce la cantidad de agua libre y aumenta, por tanto la viscosidad plástica y la tensión de flujo umbral (Sheinn, 2007).

3.7.3. Difracción rayos X (DFX) y fluorescencia (FRX)

Para conocer la composición mineralógica, se ha empleado la técnica de difracción de rayos X sobre muestras pulverizadas hasta un tamaño de grano inferior a 50 µm. El equipo empleado ha sido un difractor de Rayos-X, efectuando un barrido de 2θ entre los 2 y los 60°, en incrementos de 0,050° y tiempo de lectura de 2,5 segundos. La radiación empleada es de 1,54 Å (Cu-Kα).

También se ha realizado un análisis mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, la cual permite conocer los contenidos en óxidos presentes en la muestra de estudio.

A continuación, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos por ambos fillers en los ensayos de difracción:

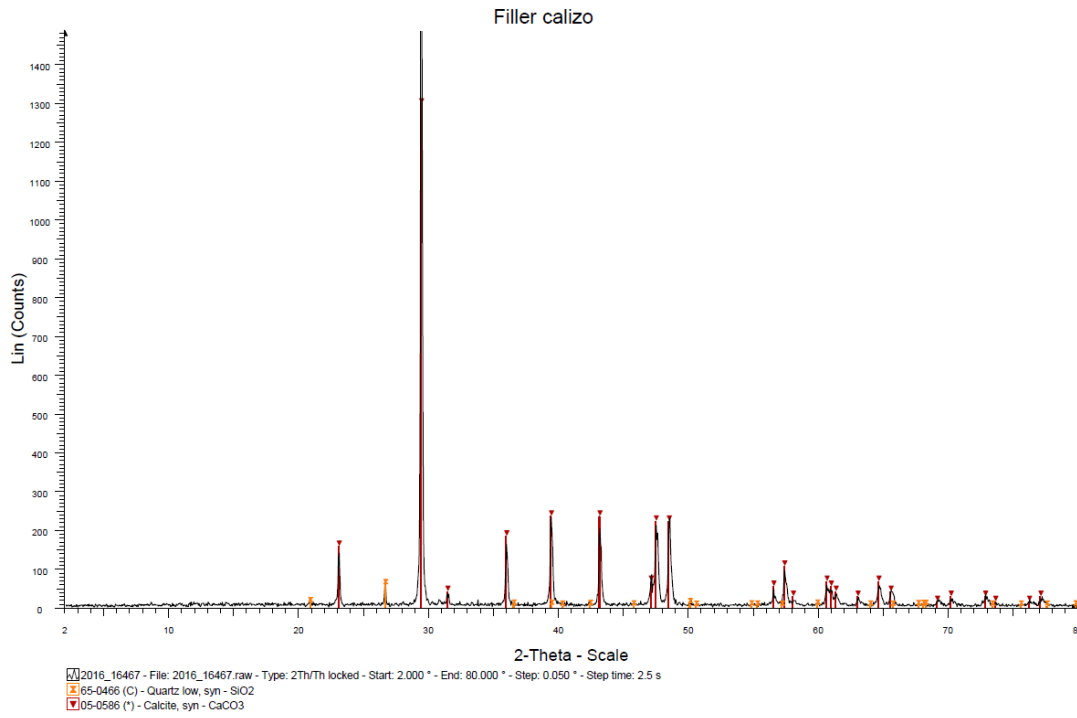


Figura 22: Difractograma de la muestra del filler calizo

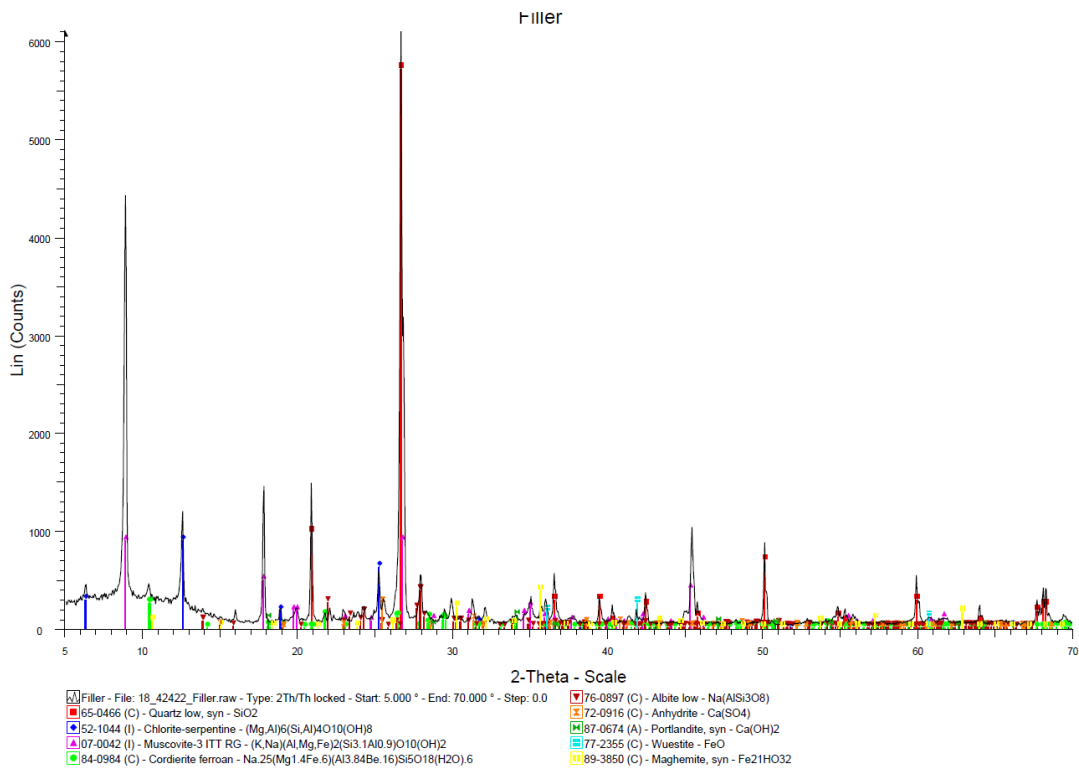


Figura 23: Difractograma de la muestra de filler de recuperación

Por último, se presenta una tabla comparativa de los resultados en porcentaje en masa de ambos fillers en los ensayos de fluorescencia:

	FILLER CALIZO	FILLER RECUPERACIÓN
CaO	55	0,5
SiO ₂	1,5	54,3
Al ₂ O ₃	0,45	23,9
Fe ₂ O ₃	0,22	7,8
K ₂ O	0,12	5
Na ₂ O		1,6
MgO	0,49	2,1
SO ₃	0,17	0,34
TiO ₂		0,99
P ₂ O ₅		0,12
MnO		0,084
Rb ₂ O		0,024
ZnO	0,009	0,022
SrO	0,047	0,012
CuO	0,009	0,01
ZrO ₂	0,003	0,004
NiO		
PPC a 975	41,9	3

Tabla 5. Fluorescencia de rayos X del filler calizo y filler de recuperación.

Los resultados de los ensayos de difracción muestran que, mientras que en el filler calizo comercial, el principal componente encontrado es la caliza, en el filler de recuperación aparece el cuarzo y la moscovita como minerales predominantes. Esto se corrobora con los datos obtenidos de la fluorescencia, en los que se aprecia el óxido de cal como predominante en el filler calizo, mientras que el de recuperación presenta elevados contenidos en óxidos de silicio y óxido de aluminio.

3.7.4. Pérdida por calcinación

Con este ensayo se obtiene el contenido de carbón inquemado en las cenizas, dato que afecta a la demanda de agua del futuro hormigón, así como su durabilidad o compatibilidad con cierto tipo de aditivos.

Los valores de pérdida por calcinación obtenidos por el filler calizo indican la presencia de carbonato cálcico, principal compuesto de este filler. Sin embargo, en el filler de recuperación se aprecia presencia de carbono orgánico correspondiente a algún tipo de hidrocarburo.

3.8. Árido reciclado

El árido reciclado procede de la limpieza, machaqueo y clasificación de piedra, hormigón y restos cerámicos. Es suministrado por la empresa Conteco, situada en La Coruña.

Puesto que la granulometría de este árido no coincide con la de la arena que va a sustituir, se decide tamizar y seleccionar la fracción por debajo de 4mm para conseguir así una arena de tamaño máximo similar a la natural, y que no se produzcan diferencias de comportamiento debido a las variaciones en su granulometría.



Figura 24. Muestra de árido reciclado antes de tamizar (izda) y después de tamizar por el tamiz de 4mm (dcha)

Una vez realizada la separación, se le realizan los mismos ensayos que a las arenas naturales: granulometría, densidad y absorción.

En el ensayo de granulometría se aprecia una mayor cantidad de finos que en las arenas convencionales analizadas, contando con un 18,80%. En la siguiente tabla se resume los datos obtenidos:

	Árido reciclado	Arena 1	Arena 2
Tamaño	0/4	0/4	0/2
Tamiz 8mm	100%	100%	100%
Tamiz 4mm	100%	93,93%	100%
Tamiz 2mm	81,47%	47,72%	94,82%
Tamiz 1mm	57,13%	23,35%	65,19%
Tamiz 0,5mm	42,06%	11,85%	42,10%
Tamiz 0,25mm	28,46%	5,64%	26,10%
Tamiz 0,125mm	18,80%	2,21%	13,27%
Tamiz 0,063mm	12,90%	0,08%	3,77%

Tabla 6. Granulometría del árido reciclado en comparación con la Arena 1 y la Arena 2.

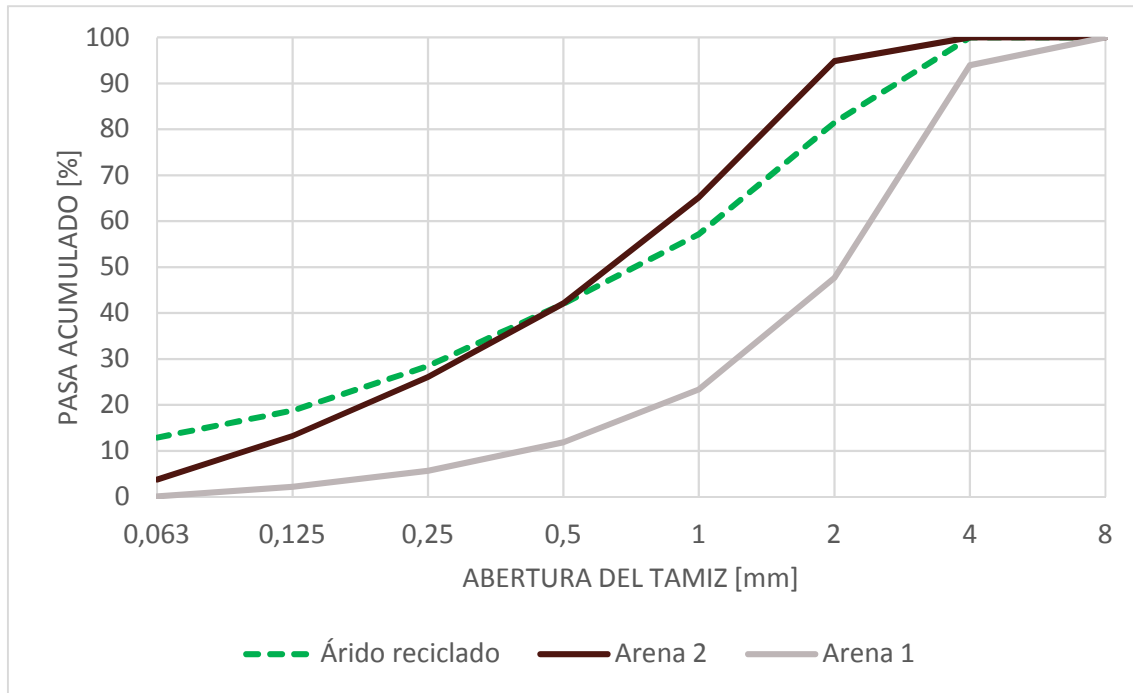


Figura 25. Granulometría del árido reciclado en comparación con las arenas naturales

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de densidad y absorción:

	Ár. reciclado	Arena 1	Arena 2
Densidad aparente (g/cm ³)	2,47	2,64	2,70
Densidad de partículas sec en estufa (g/cm ³)	2,23	2,50	2,67
Densidad saturada super. Seca (g/cm ³)	2,33	2,55	2,69
Absorción a 24h (%)	4,31 %	2,16 %	0,35 %

Tabla 7. Densidades y absorción del árido reciclado en comparación con las arenas naturales

A la vista de los resultados del árido reciclado en comparación con los de las dos arenas analizadas, se opta por utilizar como arena natural, la Arena 2. Aunque en valores de densidad y absorción se aproxima más la Arena 1, en la granulometría difiere notablemente y es por ello, que se descarta su uso.

La diferente cantidad de finos apuntada anteriormente se ve reflejada en el notable aumento de los niveles de absorción que posee el árido reciclado, en comparación con la arena convencional, lo que generará una mayor demanda de agua en la mezcla. En cuanto a las densidades, se aprecia un descenso debido al tamaño e irregularidad de las partículas que componen este tipo de áridos.

4.PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA FASE I

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA FASE I

En este capítulo se describe el programa experimental diseñado para caracterizar los distintos grouts, tanto en su estado fresco como en endurecido. Para los ensayos de grout en endurecido se realizaron un total de 150 probetas cúbicas de 10 cm de lado, empleadas para los siguientes ensayos:

- 90 probetas para ensayos de resistencia a compresión.
- 30 probetas para ensayos de control por desplazamiento.
- 30 probetas para el ensayo de módulo elástico (E).

Además de las probetas cúbicas, se realizaron 20 probetas prismáticas, de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm, empleadas para el ensayo de retracción.

Los materiales empleados fueron los descritos en el apartado anterior:

- ❖ Cemento CEM II A-V 42,5 R
- ❖ Agua potable obtenida del laboratorio de construcción de la ETSCCP.
- ❖ Arena natural granítica 0/2.
- ❖ Árido reciclado 0/4.
- ❖ Filler calizo
- ❖ Filler de recuperación
- ❖ Superplastificante BASF 3530

4.1. Dosificaciones

Para comprobar el efecto que ejercía tanto el árido reciclado como el filler de recuperación, se diseñaron dos series, una con árido reciclado y otra sólo con árido convencional dando lugar a un total de 10 combinaciones distintas, partiendo de una dosificación de control. Esta dosificación de control fue diseñada para conseguir la mayor fluidez posible de la mezcla, por lo que se realizaron numerosas pruebas en amasadas pequeñas de 1,5 litros, variando tanto el contenido de áridos, como de cemento, aditivo o la relación agua/cemento.

El filler de recuperación se introdujo en sustitución del filler calizo en distintos porcentajes para poder averiguar la cuantía máxima que se podía añadir de este residuo. Los porcentajes de sustitución, sobre el volumen, fueron del 0%, 25%, 50%, 75% y 100%.

En cuanto a la serie con árido reciclado, se empleó un 20% de este residuo respecto a la cantidad total de áridos.

Todas las mezclas se realizaron con una relación agua/cemento de 0,61 para buscar mayor fluidez y trabajabilidad, así como la misma dosificación de aditivo, un 0,5% sobre la masa de cemento.

La nomenclatura utilizada para las distintas mezclas indica el porcentaje de filler de recuperación seguido de las siglas FR y si cuenta con árido reciclado (indicado con “20AR”) o si no (indicado con “00AR”). En los siguientes apartados se resumen sus composiciones.

4.1.1. Serie con árido reciclado

Volumen (l)	100FR20AR	75FR20AR	50FR20AR	25FR20AR	00FR20AR
Cemento	188,52	188,52	188,52	188,52	188,52
Agua	348,77	348,77	348,77	348,77	348,77
Arena natural	276,87	276,87	276,87	276,87	276,87
Árido reciclada	69,22	69,22	69,22	69,22	69,22
Filler calizo	0,00	28,48	56,96	85,43	113,91
Filler de rec.	113,91	222,13	56,96	28,48	0,00
Aditivo	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71
TOTAL	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 8. Dosificaciones de la serie con árido reciclado en volumen (l)

Masa (kg)	100FR20AR	75FR20AR	50FR20AR	25FR20AR	00FR20AR
Cemento	574,99	574,99	574,99	574,99	574,99
Agua	348,77	348,77	348,77	348,77	348,77
Arena natural	744,78	744,78	744,78	744,78	744,78
Árido reciclada	166,12	166,12	166,12	166,12	166,12
Filler calizo	0,00	75,18	150,36	225,55	300,73
Filler de rec.	296,17	85,43	148,09	74,04	0,00
Aditivo	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87
TOTAL	2.133,71	2.134,85	2.135,99	2.137,13	2.138,26

Tabla 9. Dosificaciones de la serie con árido reciclado en masa (kg)

4.1.2. Serie sin árido reciclado

Volumen (l)	100FR00AR	75FR00AR	50FR00AR	25FR00AR	00FR00AR
Cemento	188,52	188,52	188,52	188,52	188,52
Agua	348,77	348,77	348,77	348,77	348,77
Arena natural	337,31	337,31	337,31	337,31	337,31
Árido reciclada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filler calizo	0,00	30,67	61,34	92,01	122,69
Filler de rec.	122,69	92,01	61,34	30,67	0,00
Aditivo	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71
TOTAL	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 10. Dosificaciones de la serie sin árido reciclado en volumen (l)

Masa (kg)	100FR-20AR	75FR20AR	50FR20AR	25FR20AR	00FR20AR
<i>Cemento</i>	574,99	574,99	574,99	574,99	574,99
<i>Agua</i>	348,77	348,77	348,77	348,77	348,77
<i>Arena natural</i>	907,37	907,37	907,37	907,37	907,37
<i>Árido reciclada</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Filler calizo</i>	0,00	80,97	161,95	242,92	323,89
<i>Filler de rec.</i>	318,98	239,24	159,49	79,75	0,00
<i>Aditivo</i>	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87
TOTAL	2.152,99	2.154,22	2.135,99	2.156,67	2.157,90

4.2. Proceso de amasado y fabricación de probetas

Se establece un proceso de amasado igual para las diez dosificaciones, imponiendo un orden de introducción de los materiales en la amasadora, así como los plazos entre cada acción:

1. (t = 0 min). Se humedece la amasadora y se introduce en ella la arena natural, árido reciclado, filler calizo y filler de recuperación junto con una pequeña cantidad de agua correspondiente al 80% de saturación de los áridos. Se enciende la amasadora y se mantiene en funcionamiento durante un minuto.
2. (t = 1 min). Se detiene la amasadora y se deja 9 minutos parada, tiempo necesario para que los áridos alcancen el 80% de saturación.
3. (t = 10 min). Se introduce el cemento y se enciende la amasadora.
4. (t = 11 min). Con la máquina en funcionamiento se introduce el 90% del agua total de la amasada y se deja en funcionamiento 1 minuto.
5. (t = 12 min). Se introduce el 10% de agua restante mezclada con el aditivo, y se deja en funcionamiento 2 minutos.
6. (t = 14 min). Se detiene la amasadora y se deja en reposo la mezcla durante 5 minutos.
7. (t = 19 min). Se vuelve a encender la amasadora y se deja en funcionamiento durante 2 minutos.
8. (t = 21 min). Final de amasado.

En cada amasada se fabrican 23 litros de grout de los que se recogen muestras para realizar los ensayos en fresco descritos en el siguiente apartado, así como el relleno de un total de 5 moldes de probetas cúbicas (3 probetas por molde) y un molde de probetas de retracción (2 probetas por molde). Los moldes son previamente impregnados con desencofrante para facilitar el proceso de desmoldado.

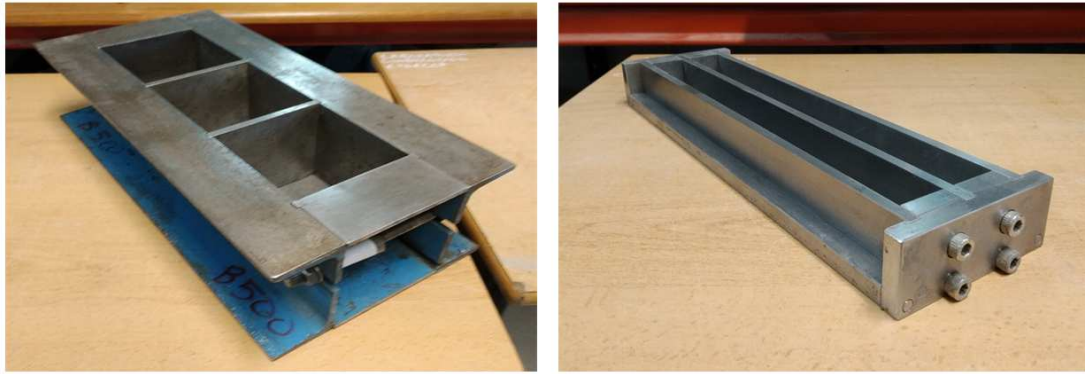


Figura 26. Molde para probetas cúbicas (izda) y molde para probetas de retracción (dcha)

Una vez rellenos, se cubren con plástico y se guardan en la cámara climática a temperatura y humedad constante de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ y $60 \pm 5\%$ de humedad durante 24h.



Figura 27. Proceso de llenado de moldes

4.3. Propiedades en estado fresco

Estos ensayos se realizan en los primeros minutos tras finalizar la amasada, antes de que comience el proceso de endurecimiento.

4.3.1. Densidad en fresco

Se calcula la densidad en fresco siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 1015-6 (AENOR, 1999a), utilizando directamente los moldes de probetas cúbicas empleados para los diferentes ensayos de endurecido. Conociendo el peso de los moldes vacíos, el peso de los moldes una vez rellenos y el volumen de los huecos ($3 \times 10 \times 10 \times 10 = 3000 \text{ cm}^3$), se puede calcular con una simple relación entre masa y volumen, la densidad aparente del grout fresco.

4.3.2. Mesa de sacudidas

Este ensayo, junto con el *Minislump*, se utilizan para conocer la consistencia y el valor del escurrimiento del grout, indicador de la trabajabilidad del material. Así mismo, viendo los bordes del grout extendido puede apreciarse la presencia o no de segregación en la mezcla (Sheinn, 2007).

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 1015-3:2000 (AENOR, 2000), colocando un molde troncocónico de 60 mm de altura, diámetro interior en la base de 100 mm y diámetro superior de 70 mm, sobre el disco de la mesa de sacudidas. A continuación, se rellena en dos capas, compactando cada una mediante 10 golpes con un pisón, si es necesario. Se enrasa, se levanta el molde verticalmente, y se efectúan 15 sacudidas a una velocidad de una por segundo. Al finalizar las sacudidas, se mide en dos direcciones perpendiculares el diámetro final alcanzado por el grout.



Figura 28. Medición del escurrimiento en el ensayo de la mesa de sacudidas

Para mezclas con menor porcentaje de filler de recuperación, que presentan una viscosidad muy baja, este ensayo no resulta válido. El diámetro del plato de la mesa de sacudidas es de 30cm y la mezcla puede llegar a rebasar el borde del plato antes de alcanzar las 15 sacudidas de la mesa. Para estos casos se realiza el ensayo del *minislump*, explicado a continuación.

4.3.3. Minislump

Para las mezclas en las que la viscosidad era tan baja que no permitía realizar el ensayo anteriormente descrito, se realizaba el ensayo del *minislump* (Okamura and Ouchi, 2003), de características similares.

Para ello, se emplea el mismo molde troncocónico, situándolo esta vez sobre una placa de metal fija. La fluidez de las mezclas empleadas en la realización de este ensayo, hacen innecesario el uso de compactación por pisón, por lo que una vez rellenado el molde y enrasado, se procede al levantamiento del mismo. Al igual que en el caso anterior, se miden en dos direcciones perpendiculares el diámetro alcanzado por el grout.



Figura 29. Grout extendido tras ensayo de minislump

4.3.4. Minifunnel

Este ensayo es una variante de menores dimensiones del ensayo *V-funnel* desarrollado en la Universidad de Tokyo (Okamura and Ouchi, 2003). Su principal objetivo es conocer la habilidad del material para fluir por espacios restringidos en vertical y bajo la única acción de su propio peso. Observando la velocidad del flujo se puede conocer la tendencia al bloqueo y segregación de los componentes de la mezcla.

Tanto el *V-funnel* original (AENOR, 2011) como la variante *minifunnel*, consisten en el llenado de un molde metálico con forma de V rectangular con una pequeña compuerta en la parte inferior. Tras el llenado y enrasado del molde, se abre la abertura inferior y se mide el tiempo que transcurre en fluir la mezcla en su totalidad.

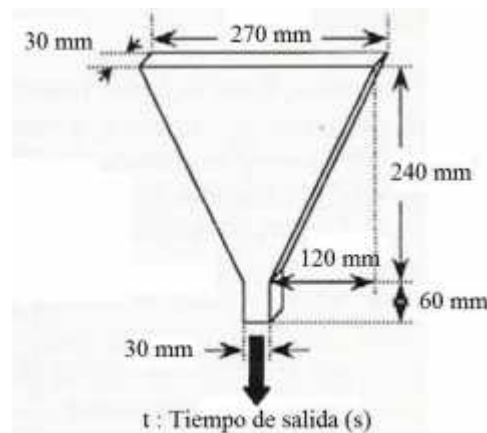


Figura 30. Dispositivo empleado en el ensayo de minifunnel (Okamura and Ouchi, 2003)

4.3.5. Reología

Se realizaron dos tipos de ensayo de reología: el *Stress Growth Test* (SGT) y el *Flow Curve Test* (FCT). Con el primero se obtiene la tensión estática, mientras que con el segundo se obtiene la relación entre los parámetros de *shear stress* y *shear rate*. Sin embargo, en este estudio se han

utilizado unidades relativas por lo que en el SGT se obtiene el valor máximo del torque estático y el valor del torque de equilibrio, y en el FCT los valores de la viscosidad plástica y el torque dinámico.

El *Stress Growth Test* consiste en medir el incremento gradual en el par torsor a medida que la pala del reómetro rota a una velocidad baja y constante después de haber permanecido en reposo durante un periodo de tiempo determinado (Rojo-Lopez, 2013). La diferencia entre los dos valores obtenidos, el torque máximo y el torque de equilibrio, es un indicador de la tixotropía del grout estudiado. Esta propiedad que presentan algunos fluidos no newtonianos describe la disminución de la viscosidad experimentada por un fluido cuando se somete a un aumento de esfuerzo de cizalla. La variación de viscosidad es siempre de carácter reversible, isotérmica y dependiente del tiempo (ACI, 2014).

Para cada amasada se realizaron dos *Stress Growth Test*, uno justo al acabar el proceso de amasado ($t = 21\text{min}$), con un periodo de reposo inicial de 7min y una velocidad de giro de 3 rpm, y un segundo ensayo a los 10 minutos ($t = 31\text{min}$) con un periodo de reposo inicial de 20 minutos y misma velocidad de rotación.

En el *Flow Curve Test* (FCT), a diferencia del anterior, se hace rotar la pala del reómetro a una velocidad elevada, de 70 rpm, en un periodo corto de tiempo. Esta velocidad es mantenida durante 1 minuto, y, a continuación, se va reduciendo por tramos de 10 segundos hasta llegar a cero, obteniendo durante este descenso el par torsor generado. Los resultados pueden ser ajustados con un modelo reológico para obtener los valores de viscosidad relativa y de torque dinámico.

Se realizan dos ensayos FCT por amasada, justo al finalizar cada SGT. Por facilitar su comprensión, se denominaron FCT de 7 min y FCT de 20 min respectivamente, refiriéndose al ensayo que le precede.

Ambos ensayos fueron realizados introduciendo 3,5 litros del grout a estudiar en el reómetro co-axial Viskomat XL. El cubo donde se vierte la muestra, de 155mm de diámetro interior, es la parte móvil de reómetro, que rotará a la velocidad indicada por el programa. Antes de comenzar el programa, se introduce una pala, tipo Window en este caso, dentro de la muestra. Esta pala permanecerá estática durante el ensayo, registrando el torque necesario para permanecer inmóvil.



Figura 31. Reómetro Viskomat XL con la pala tipo Window

4.4. Propiedades en estado endurecido

Después de permanecer 24h en la cámara climática a $22 \pm 2^\circ\text{C}$ y $60 \pm 5\%$ de humedad relativa, se procede al desmoldado de las probetas. Una vez extraídas del molde, éstas vuelven a la cámara climática.

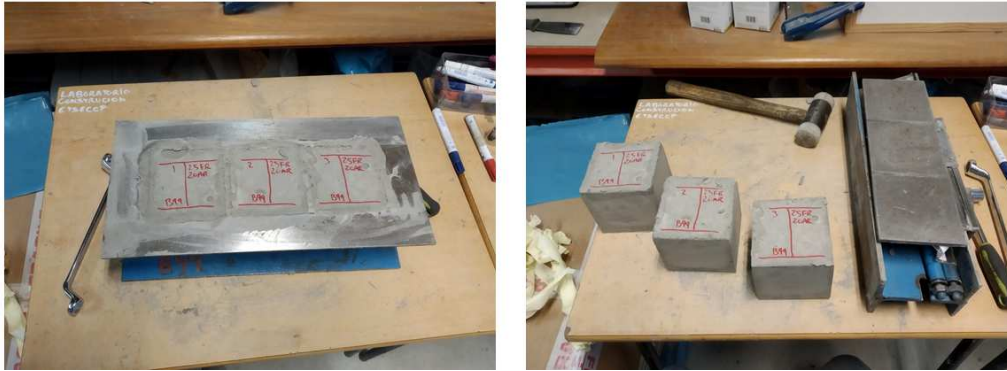


Figura 32. Proceso de desmoldado probetas cúbicas

4.4.1. Resistencia a compresión

Se realizan tres ensayos de resistencia a compresión para cada dosificación. Para conocer los valores de resistencia a edades tempranas se llevan a cabo ensayos a 3 días, 7 días y, finalmente, para conocer el valor característico de resistencia a compresión se realiza un último ensayo a 28 días de edad, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 12390-2:2009 (AENOR, 2009a). En cada ensayo se rompen tres probetas fabricadas y curadas de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2009b), utilizando la prensa hidráulica Rock Mechanics Test System 815 de MTS, situada en las instalaciones del CITEEC (Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil). La velocidad de carga se incrementa a razón constante de 5kN/s hasta llegar a rotura.



Figura 33. Prensa Rock Mechanics Test System 815

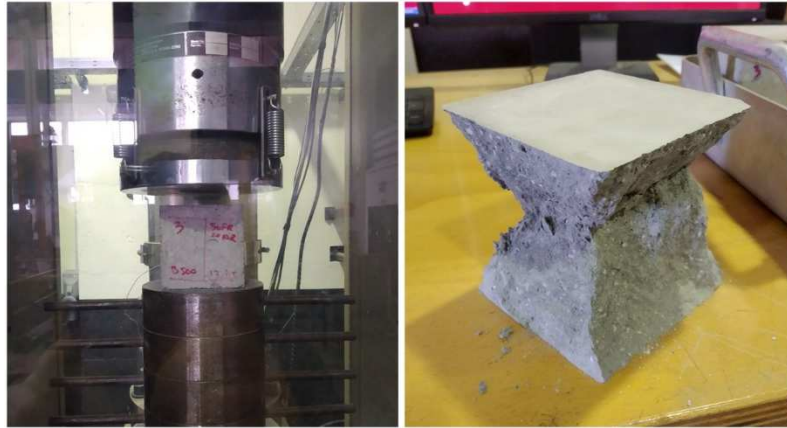


Figura 34. Probeta colocada en la máquina de ensayo (izda) y probeta tras finalizar el ensayo (dcha).

Los datos de la carga máxima soportada por la probeta son obtenidos en kN. Para transformarlos a valores de tensión, se divide la carga máxima entre la superficie de la probeta (medida previamente a la rotura).

4.4.2. Ultrasonidos

Este ensayo se realiza a las probetas que van a ser ensayadas a compresión, justo antes de comenzar el ensayo. La velocidad del pulso ultrasónico ayuda a determinar, de manera indirecta, la resistencia y el módulo dinámico de la mezcla, relacionando estos datos con su compacidad y densidad (Esquinas *et al.*, 2017). Por lo tanto, cabe esperar que la velocidad del pulso aumente a medida que se va incrementando la edad de las probetas y que muestra una evolución similar al paso del tiempo que la experimentada por la resistencia (Dehwah, 2012).



Figura 35. Ensayo de ultrasonidos

Tras ajustar los parámetros necesarios en el aparato de medida y calibrarlo, se marca el centro de dos caras opuestas de cada probeta y se le aplica un gel con la finalidad de obtener un apoyo total de los electrodos. A continuación, se colocan ambos electrodos en las posiciones marcadas de la probeta y comienza la transmisión de la onda desde uno al otro, a través del material de

estudio. El aparato registra la velocidad de onda y el tiempo transcurrido desde la emisión de la onda hasta su recepción.

4.4.3. Retracción

Este ensayo es utilizado para conocer el valor de retracción experimentada por cada grout. Esta deformación se produce a causa del intercambio de humedad del material con el ambiente, concentrándose principalmente en los primeros días de edad y reduciendo su variación con el paso del tiempo. Se trata de un proceso complejo que depende de numerosos factores como pueden ser la temperatura y la humedad relativa, el tamaño del elemento, el contenido de cemento, la relación agua/cemento, cantidad y características de los áridos, tipo de curado etc. (Esquinas *et al.*, 2017).

El ensayo consiste en la medición de la variación de longitud de las probetas con el paso del tiempo, siguiendo los parámetros establecidos por la norma UNE 80112:2016 (AENOR, 2016b).

Las probetas cuentan con unos tornillos embebidos en cada extremo, que encajan en el reloj comparador y facilitan una medición de mayor precisión.



Figura 36. Probetas de retracción

Para obtener las lecturas, primero se coloca un testigo de medidas conocidas e invariables y se marca como referencia. A continuación, se coloca la probeta que se desee medir y se toman cuatro medidas, una por cada cara. Se realiza la media de las cuatro medidas y se repite el proceso para el resto de las probetas.

La retracción se mide cada 24h durante los primeros 7 días, cada 48h los siguientes 7 días y cada 2 semanas a partir de ese punto, puesto que las variaciones de longitud y peso se vuelven cada vez más reducidas.



Figura 37. Ensayo de retracción

4.4.4. Control por desplazamiento

La principal diferencia entre este ensayo y el ensayo de compresión radica en cómo se incrementa la carga. Como su nombre indica, en este procedimiento la carga aumenta en función del desplazamiento, en mm/min en lugar de los kN/s del caso anterior. Para su realización se utiliza la misma prensa hidráulica Rock Mechanics Test System 815 de MTS situada en las instalaciones del CITEEC.

La velocidad fue calculada a partir de la deformación de rotura del hormigón a compresión simple (ϵ_{co}), de valor 0,002 para hormigones de resistencia a compresión simple inferior a 50MPa (CPH, 2011), buscando alcanzar el valor de rotura durante el segundo minuto de ensayo. Pasado este punto, la prensa continua el movimiento a la misma velocidad obteniendo por tanto la rama de descarga del diagrama tensión-deformación.

Las probetas han de ser preparadas previamente a la realización del ensayo, colocando en cada una, dos galgas extensométricas en vertical dispuestas simétricamente respecto al eje de la probeta. Se colocan además dos galgas horizontales en una probeta de cada tipo de grout para analizar la deformación sufrida en el eje perpendicular a la carga.

Para la colocación de las galgas, es necesario marcar la zona donde estará localizada la galga, lijar y limpiar la superficie para conseguir un acabado liso sin imperfecciones y a continuación, aplicar el adhesivo tipo PS, diseñado especialmente para ser utilizado en hormigones, morteros o madera. Después de un periodo de secado de 24h, se procede al pegado de las galgas.

La lectura de datos de deformación se realiza a través de un módulo HBM y un software externo al utilizado por la prensa hidráulica.

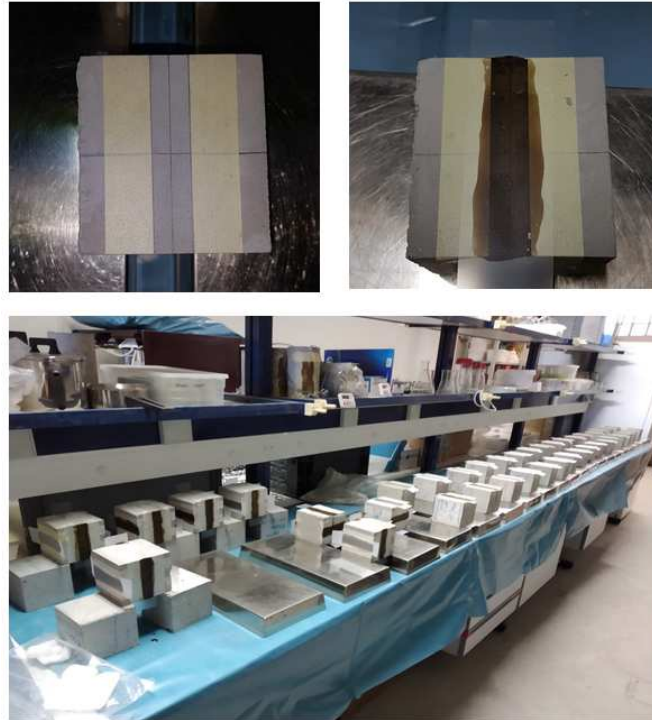


Figura 38. Preparación de probetas para los ensayos de control por deformación y módulo de Young

4.4.5. Módulo de elasticidad secante

El ensayo de módulo consiste en la aplicación de una carga uniaxial a una probeta instrumentalizada mediante galgas extensiométricas, de tal forma que además de las tensiones, se registren también las deformaciones. Con estos datos, se podrá obtener la gráfica tensión-deformación, necesaria para el cálculo del módulo de Young, según se indica en la norma UNE-EN 12390-13 (AENOR, 2014b).

A diferencia del ensayo a compresión en el que se carga a velocidad constante hasta rotura, en el de módulo se realizando 3 ciclos de carga hasta el 30% de la resistencia máxima, se mantiene la carga durante 20 segundos y se descarga a la misma velocidad que en carga. Para conocer este dato de resistencia máxima, primero se realiza el ensayo de resistencia a compresión, se calcula para cada dosificación y se programan los datos en la máquina para realizar el ensayo de módulo. Se utiliza la misma prensa hidráulica, Rock Mechanics Test System 815 de MTS para su realización, apoyado con un módulo HBM y un software específico para la recogida de datos de las galgas.

Una vez terminado el ensayo, se realizan las gráficas tensión-deformación para cada probeta, y se haya la media de las pendientes de las ramas de carga del segundo y tercer ciclo, obteniendo así el módulo elástico.

5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA FASE I

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA FASE I

En este capítulo se recogen y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la Fase I del programa experimental.

5.1. Propiedades en estado fresco

5.1.1. Ensayos industriales

Para la medida del escurrimiento se realizaron los ensayos de *minislump* y mesa de sacudidas, en función de la viscosidad de cada mezcla.

Minislump

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los tres ensayos de *minislump* realizados a cada dosificación:

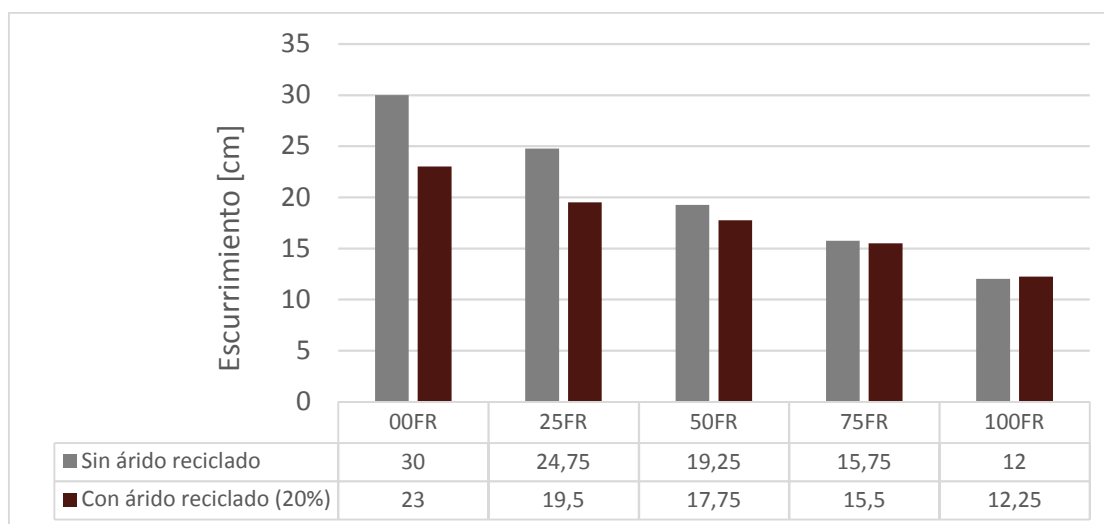


Figura 39. Resultados del ensayo minislump en $t = 21$ minutos

Puede observarse una notable reducción del valor de escurrimiento a medida que aumenta el contenido de filler de recuperación, llegando a reducirse hasta en un 60% si comparamos los valores de la dosificación de control con la que tiene un 100% de filler de recuperación.

Como se mostró en el análisis de los dos fillers, el de recuperación presenta una superficie específica mucho mayor a la del filler calizo comercial, lo que se traduce en un aumento de absorción de agua. Esto genera una menor cantidad de agua libre y una reducción de la trabajabilidad, como muestran los resultados del ensayo. Estos resultados coinciden con los obtenidos por los investigadores (Martín *et al.*, 2013)(Esquinas *et al.*, 2017).

La incorporación de árido reciclado resulta también perjudicial para el escurrimiento. Sin embargo, esta reducción se vuelve inapreciable en dosificaciones con altos contenidos de filler de recuperación, en las que el comportamiento seco lo determina el filler y el aporte del árido reciclado pasa desapercibido.

Estas diferencias mostradas se mantienen en el tiempo, como muestran los resultados de los ensayos realizados a 31 minutos y a 51 minutos del inicio de amasado respectivamente. Estos tiempos de repetición de los ensayos son consecuencia de la realización simultánea de los ensayos de reología.

En la [Fig. 40] y [Fig.41] se muestra la evolución del escurrimiento obtenida por la serie sin y con árido reciclado respectivamente, contando el tiempo a partir del final del amasado ($t = 21$ min). Se puede apreciar como la pérdida de trabajabilidad se produce con mayor velocidad en la serie con árido reciclado debido a la mayor presencia de finos y al elevado valor de absorción de este material.

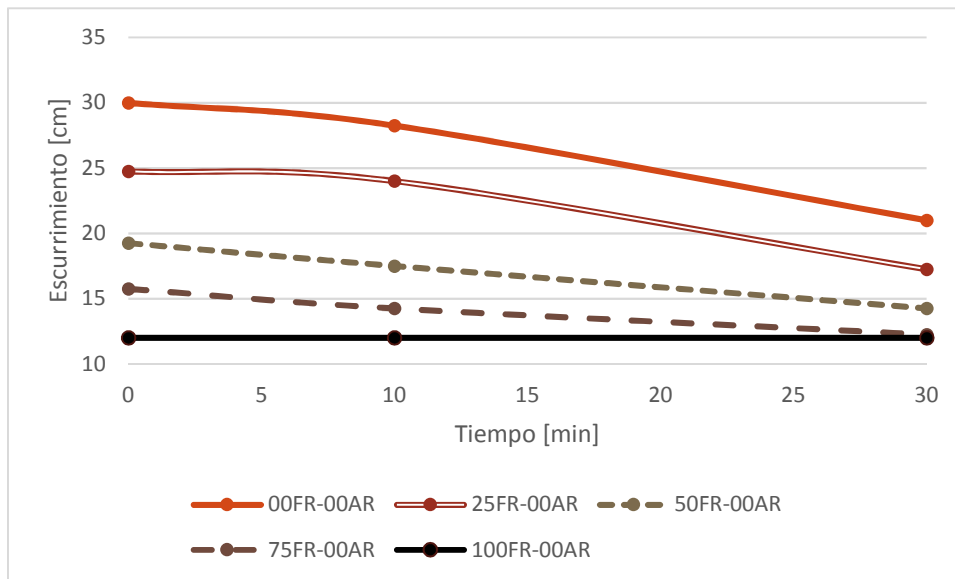


Figura 40. Evolución de los valores de escurrimiento (minislump) de la serie sin árido reciclado

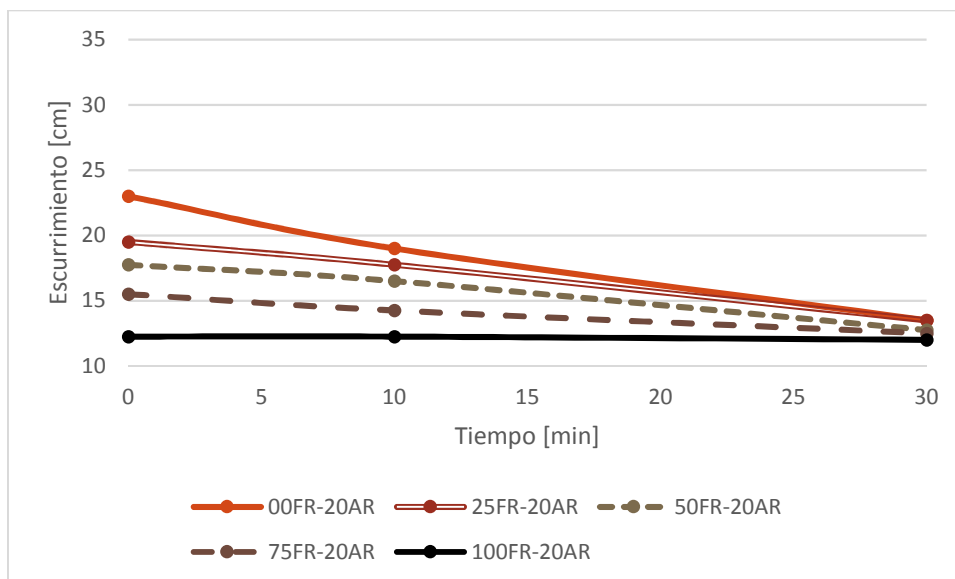


Figura 41. Evolución de los valores de escurrimiento (minislump) de la serie con árido reciclado

Mesa de sacudidas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por cada dosificación en el ensayo de la mesa de sacudidas:

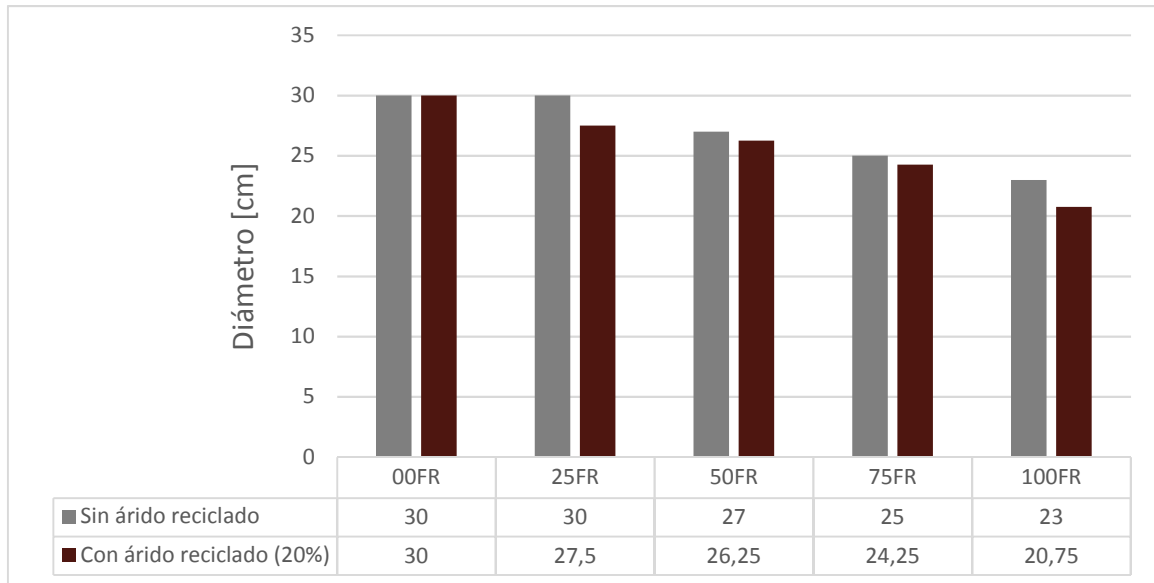


Figura 42. Resultados del ensayo mesa de sacudidas para $t = 21$ minutos

Los resultados, como era de esperar, muestran el mismo comportamiento que en el ensayo anterior, mostrando unas consistencias más secas a medida que se incrementa la cantidad de filler de recuperación. Nótese que el diámetro del plato de la mesa de sacudidas es de 30cm, por lo que, una vez sobrepasado esta cifra, aunque no se hayan producido las 15 sacudidas, se detiene el ensayo. El caso de las mezclas sin filler de recuperación, por ejemplo, no indica que ambas obtuvieran el mismo resultado, si no que ambas sobrepasaron el límite del plato antes de finalizar la prueba.

Al igual que en el caso anterior, los resultados se repitieron a los 10 min y 30 min desde el final de amasado para coincidir con los ensayos reológicos.

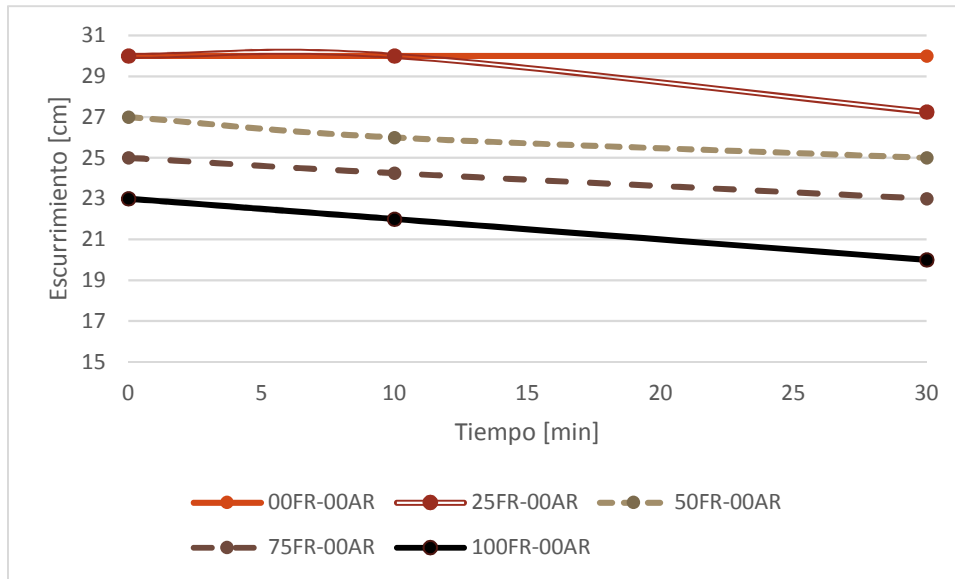


Figura 43. Evolución de los valores de escurrimiento (mesa de sacudidas) de la serie con árido reciclado

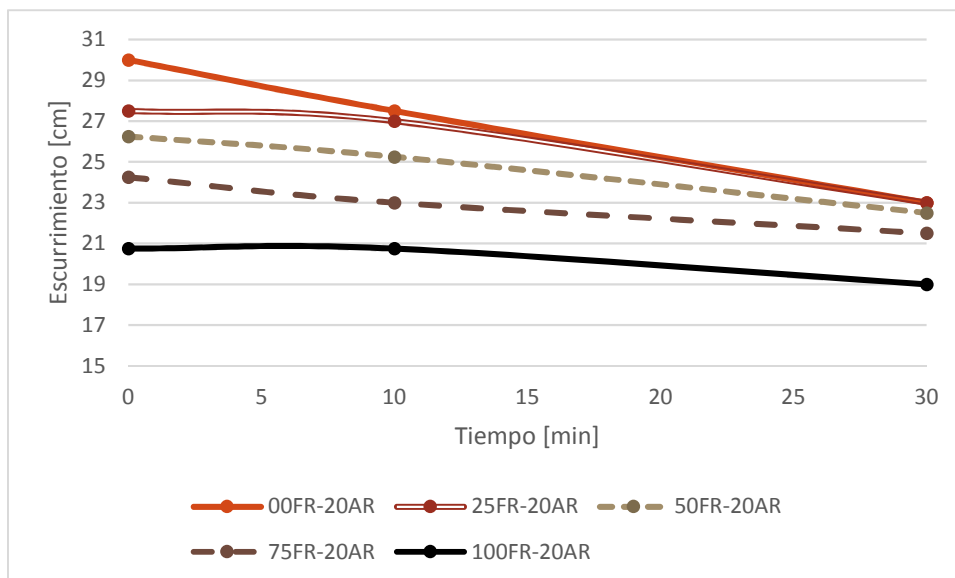


Figura 44. Evolución de los valores de escurrimiento (mesa de sacudidas) de la serie sin árido reciclado

Ensayo minifunnel

Al igual que en los ensayos anteriores, también se realizaron los ensayos justo al terminar la amasada ($t = 21\text{min}$), transcurridos 10 min ($t = 31\text{min}$) y transcurridos 30 minutos ($t = 51\text{min}$), para coincidir así con los ensayos reológicos.

Los resultados muestran una tendencia similar a los ensayos anteriores, reflejando una reducción de la fluidez de la mezcla a medida que se incrementa el contenido de filler de recuperación. El contenido en árido reciclado parece no mostrar variación alguna con contenidos bajos de filler, sin embargo, para la mezcla con 100% de filler de recuperación y 20%

de árido reciclado, la viscosidad obtenida fue tal que impidió terminar el ensayo, dejando el embudo atascado, y es por eso que no se representa su columna en la gráfica siguiente.

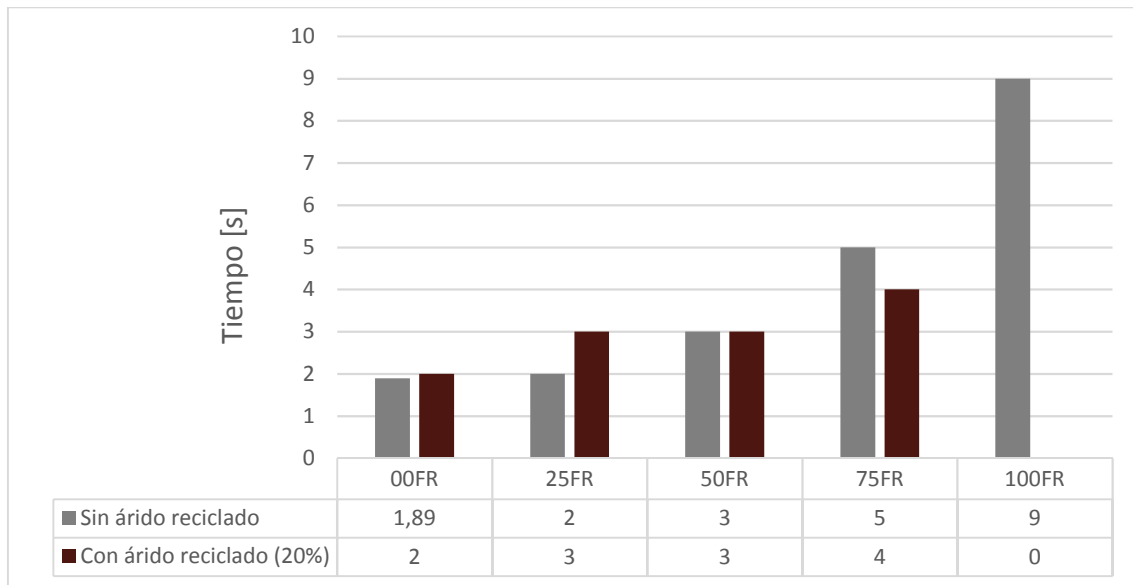


Figura 45. Resultados del ensayo minifunnel a $t = 21$ minutos

Los ensayos a 10 min y 30 min muestran un comportamiento similar, amplificando las diferencias observadas entre las dosificaciones en el ensayo inicial. En las figuras [Fig. 46] y [Fig.47] se representa la evolución de los resultados de las distintas mezclas. Al igual que ocurría en el ensayo inicial, hubo mezclas incapaces de terminar el ensayo, dejando el embudo atascado. Éstas se muestran sin datos en las gráficas.

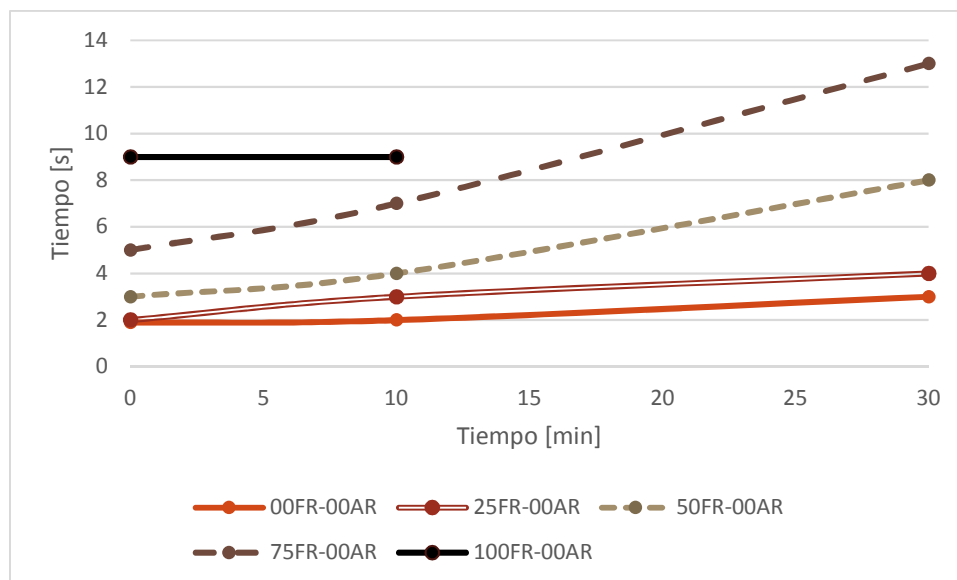


Figura 46. Evolución de los valores obtenidos en el minifunnel, de la serie sin árido reciclado

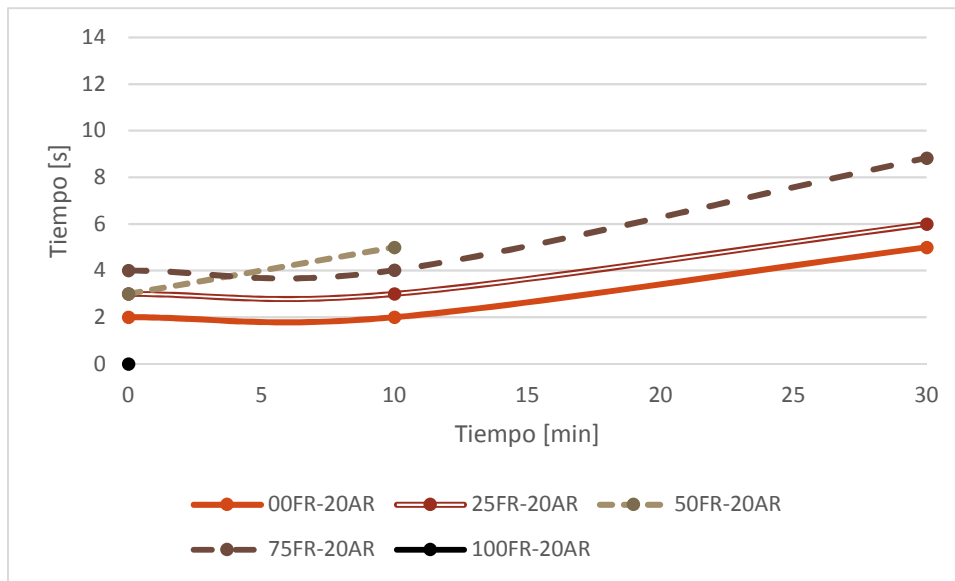


Figura 47. Evolución de los valores obtenidos en el minifunnel, de la serie con árido reciclado.

5.1.2. Densidad en fresco

Los resultados de densidad se encuentran muy próximos entre sí, mostrando una variación máxima del 4% entre ellos. El aumento en contenido de filler de recuperación, de mayor densidad que el filler calizo, repercute en un aumento de la densidad, tanto para las mezclas con árido reciclado como las que no llevan este residuo.

Grout	Densidad (g/cm ³)
00FR00AR	2,1556
25FR00AR	2,1565
50FR00AR	2,1729
75FR00AR	2,1379
100FR00AR	2,1417

Tabla 11. Densidad en fresco de los grouts sin árido reciclado

El árido reciclado, por su parte, al presentar menor densidad que la arena natural que sustituye, genera un descenso de la densidad del grout.

Grout	Densidad (g/cm ³)
00FR20AR	2,0876
25FR20AR	2,1351
50FR20AR	2,1416
75FR20AR	2,1169
100FR20AR	2,1169

Tabla 12. Densidad en fresco de los grouts con árido reciclado

5.1.3. Ensayos reológicos: Stress Growth Test (SGT)

Como se mencionó en el apartado anterior, para los ensayos de SGT se utilizaron unidades relativas, por lo que los resultados obtenidos son el torque máximo y el torque de equilibrio. La diferencia entre ambos se puede utilizar como medida para aproximar la cantidad de energía necesaria para romper la microestructura de los distintos grouts, es decir, analizar su tixotropía.

Dosificación sin árido reciclado

En las dosificaciones sin árido reciclado, se pueden apreciar como a medida que se incrementa la cantidad de filler de recuperación, aumenta la cantidad de energía necesaria para romper la mezcla. Estas diferencias se acentúan sobre todo para las mezclas con un 75% y un 100% de filler de recuperación en las que el torque medido sufre un aumento de más de un 375% y un 500% respectivamente, con respecto a la mezcla de referencia.

En cuanto a la variación del torque en función del tiempo, se observan diferencias en todas las dosificaciones, acentuándose más en la mezcla de control, en la que el aumento del tiempo de reposo conllevó un aumento del 218% del torque, mientras que la mezcla con 100% de filler de recuperación, tan solo un 33%.

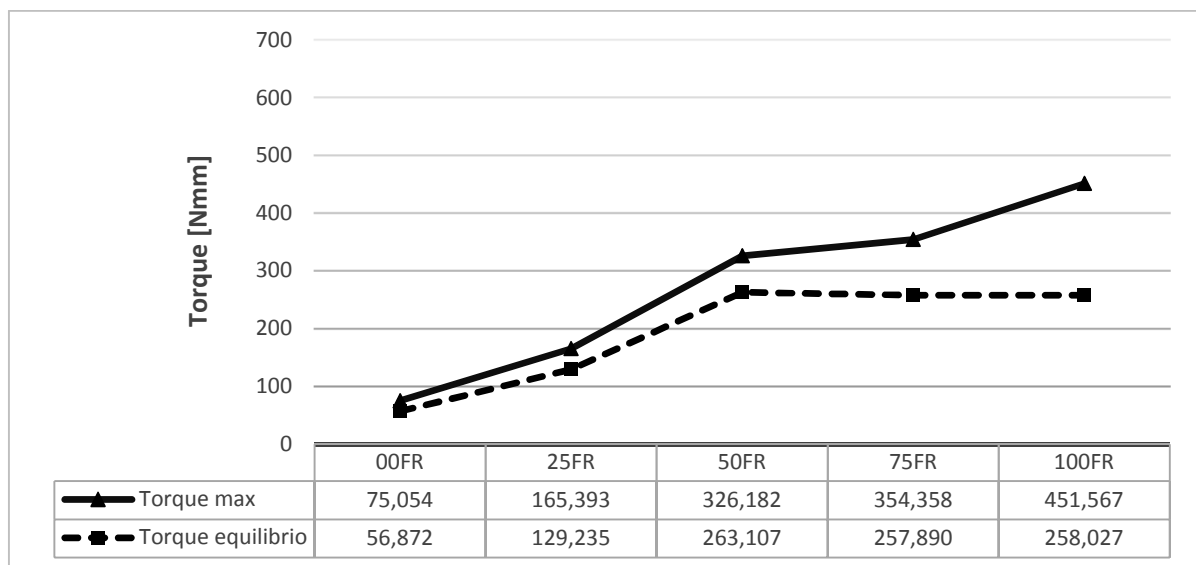


Figura 48. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 7 min de reposo de mezclas sin árido reciclado.

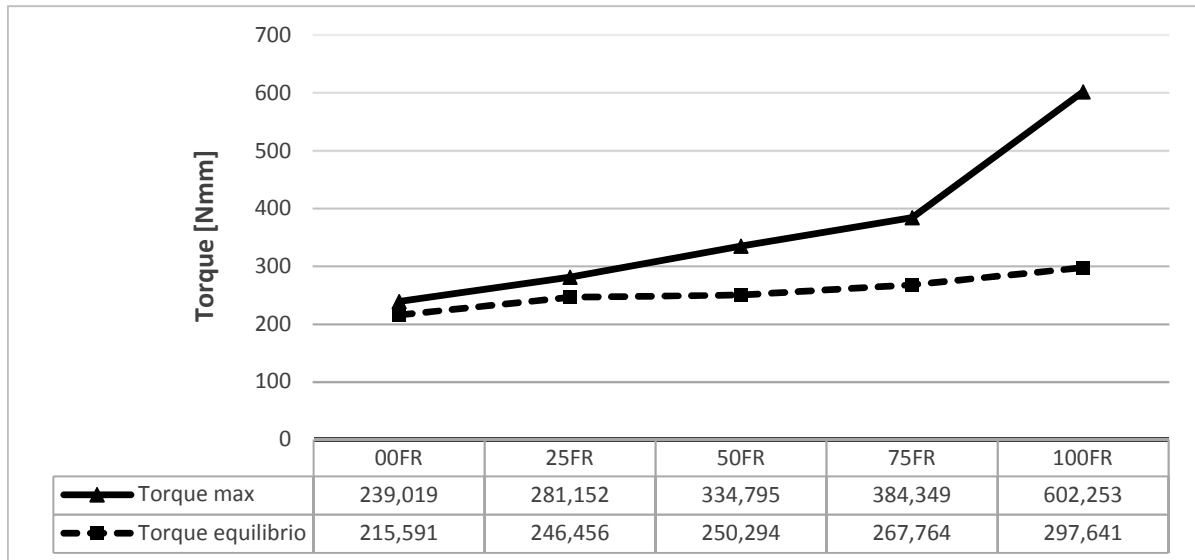


Figura 49. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 20 minutos de reposo de las mezclas sin árido reciclado

Dosificación con árido reciclado

En cuanto a las dosificaciones realizadas con árido reciclado, el incremento del torque a medida que se aumenta la cantidad de filler de recuperación también es notable, aunque en menor medida que en la serie anterior. En este caso, el torque máximo aumenta en un 134% si comparamos el valor de la dosificación con 100% de filler de recuperación con respecto a la de control.

El torque obtenido por la dosificación con un 75% de filler de recuperación resulta anómalo, siendo un valor superior a la dosificación del 100%. En vista del resto de resultados, tanto del reómetro como del *minislump* y *minifunnel*, se piensa que la anomalía se debe a un error de lectura de la máquina y por lo tanto, se descarta este dato del análisis.

Al igual que en la serie anterior, también se observan variaciones del torque en función del periodo de reposo, aunque con menor diferencia entre la mezcla con la máxima sustitución de filler y la de control. En este caso, el torque experimentado en la dosificación de control se incrementó en un 100% al aumentar el periodo de reposo, mientras que en la mezcla con 100% de filler de recuperación, el torque se incrementó en un 66%.

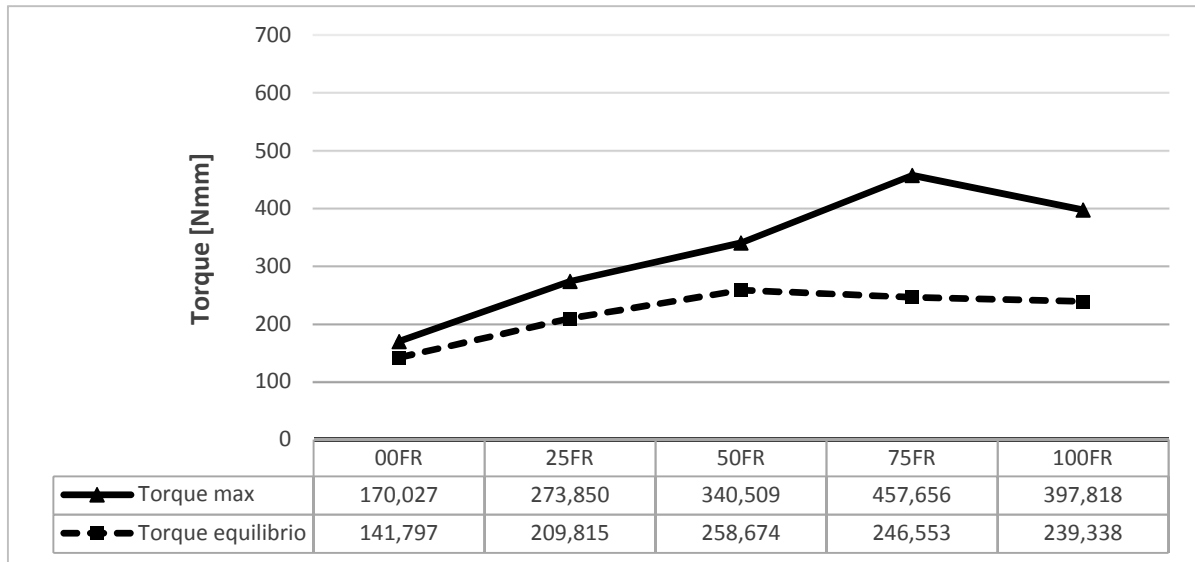


Figura 50. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 7 minutos de reposo de mezclas con árido reciclado

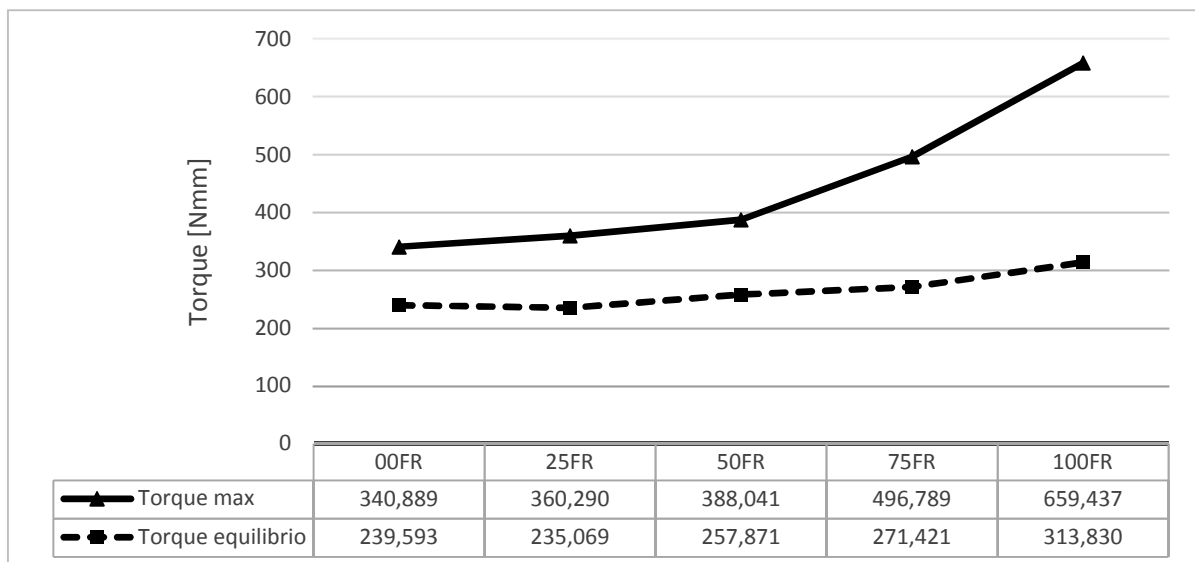


Figura 51. Torque máximo y de equilibrio del SGT de 20 minutos de reposo de mezclas con árido reciclado

Gráficas obtenidas de los distintos SGT realizados

En las siguientes figuras [Fig. 52-56] se representa la variación del torque en función del tiempo para las distintas dosificaciones analizadas:

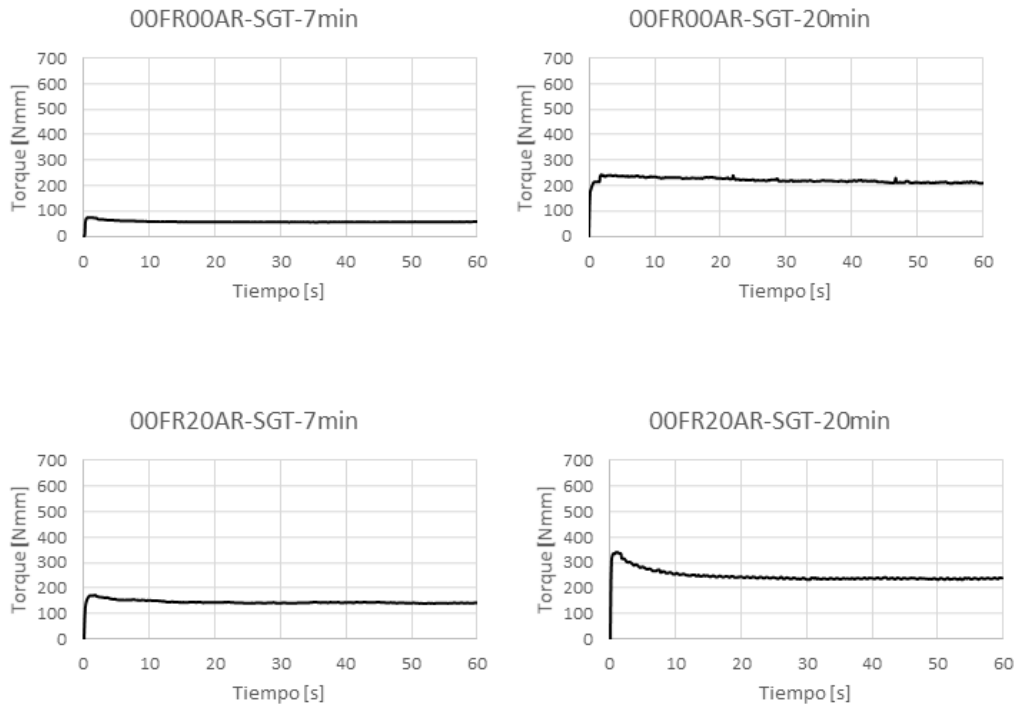


Figura 52. SGT de las dosificaciones con 0% de filler de recuperación

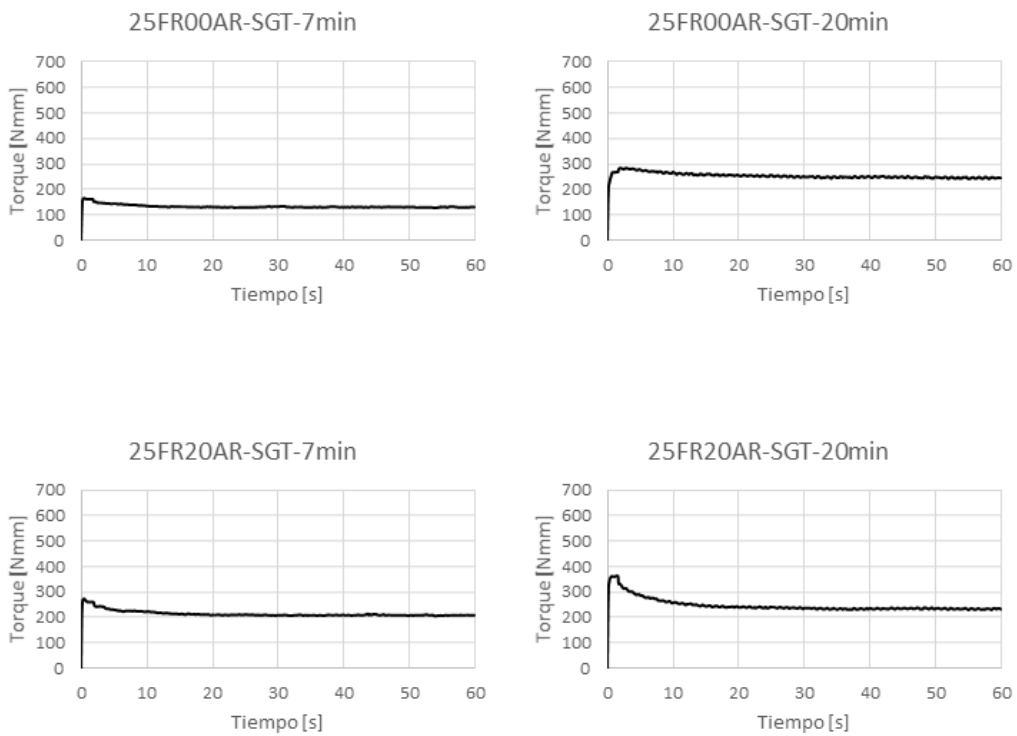


Figura 53. SGT de las dosificaciones con 25% de filler de recuperación

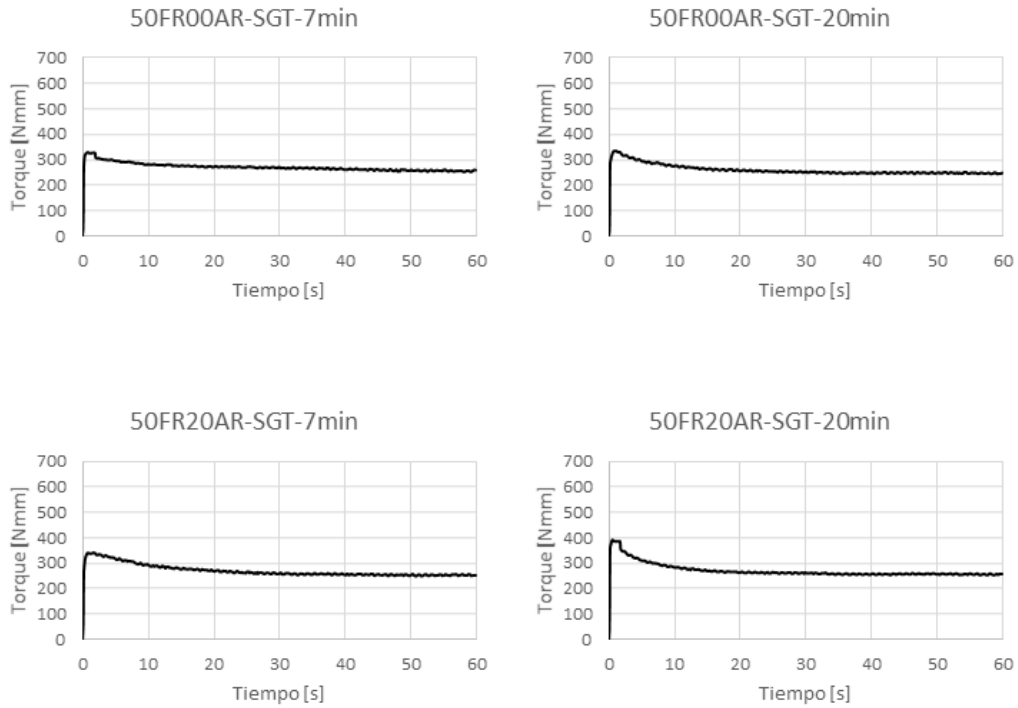


Figura 54. SGT de las dosificaciones con un 50% de filler de recuperación

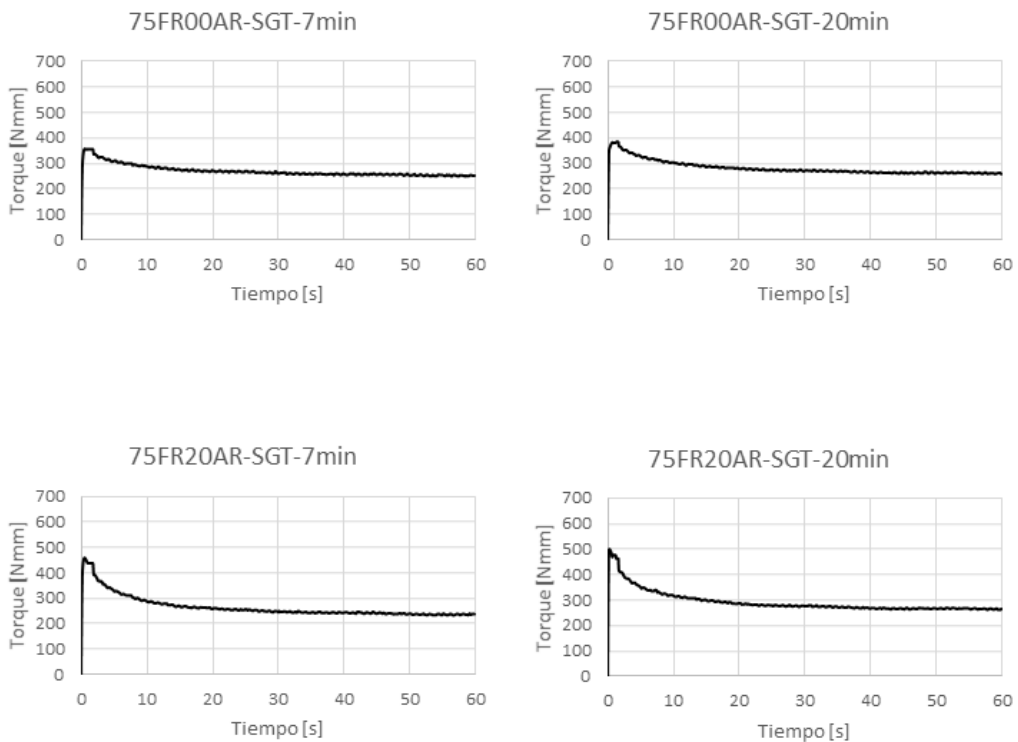


Figura 55. SGT de las dosificaciones con un 75% de filler de recuperación

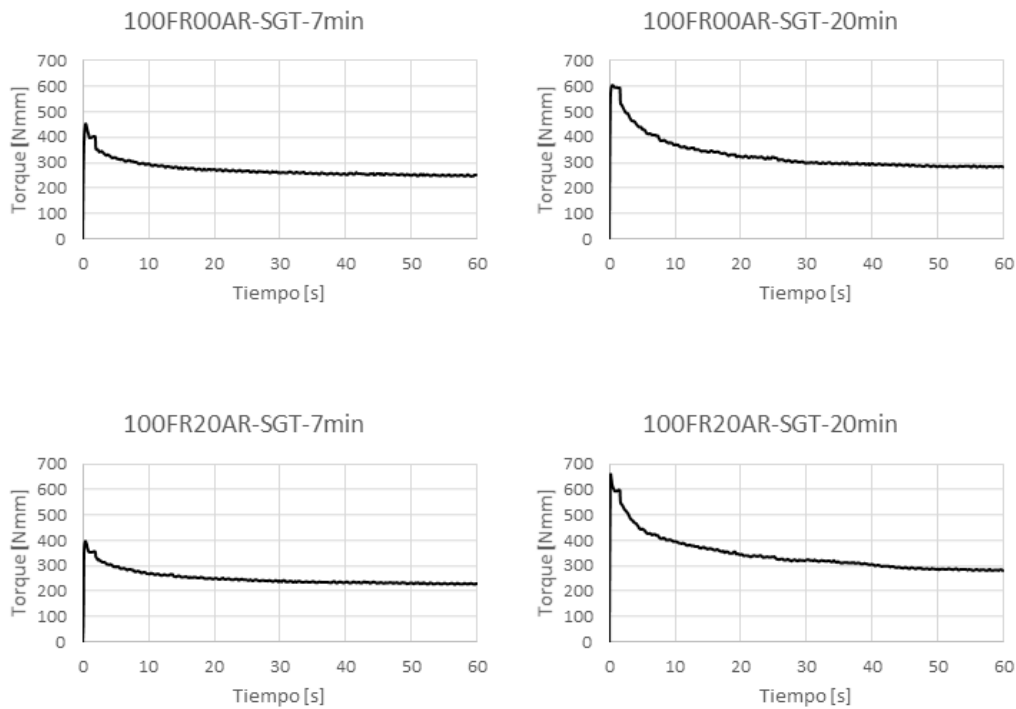


Figura 56. SGT de las dosificaciones con un 100% de filler de recuperación

5.1.4. Ensayos reológicos: Flow Curve Test (FCT)

Con los datos obtenidos de este ensayo se elaboraron curvas de flujo para cada una de las dosificaciones de acuerdo con el modelo Bingham. Esto se consigue asumiendo que el gradiente de velocidades aplicadas es proporcional a la velocidad de giro de la pala y a que la tensión de corte es proporcional al torque medido por el reómetro (Banfill, 2011).

Al seguir en unidades relativas, las gráficas muestran los valores de la viscosidad plástica y el torque dinámico.

En cuanto a la viscosidad plástica, puede notarse como al aumentar el porcentaje de filler de recuperación, se produce un incremento en la viscosidad, llegando a suponer en el caso más desfavorable, un aumento del 570%.

La incorporación de árido reciclado no presenta cambios tan acusados como el filler, aunque cabe destacar que, en contraposición a lo observado en los ensayos de *minislump* y *minifunnel*, la mayor diferencia entre ambas series se encuentra en el punto de máxima sustitución de filler de recuperación, en lugar de en los valores bajos.

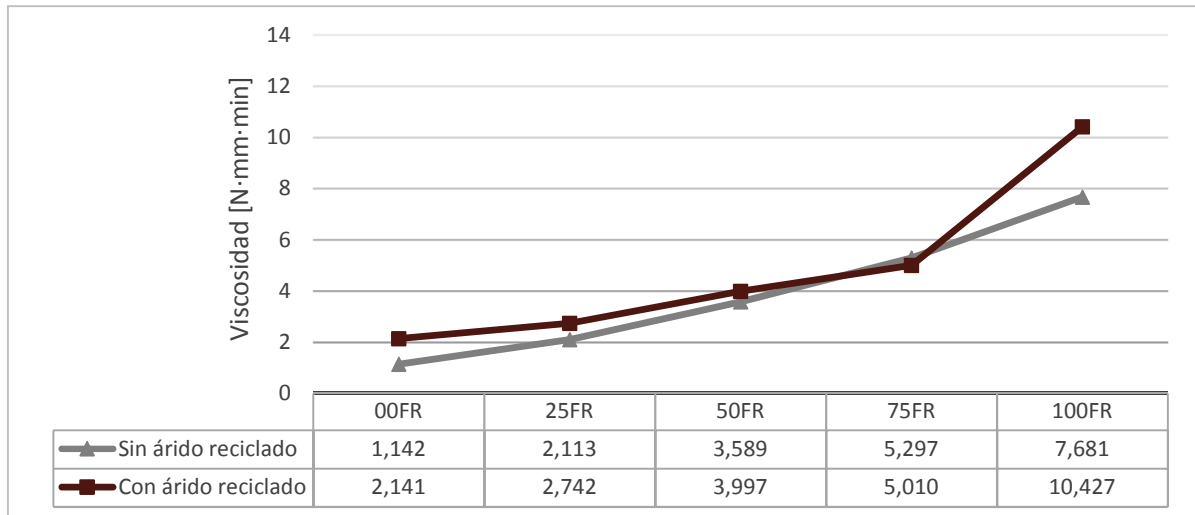


Figura 57. Viscosidad en unidades relativas. FCT 7 minutos

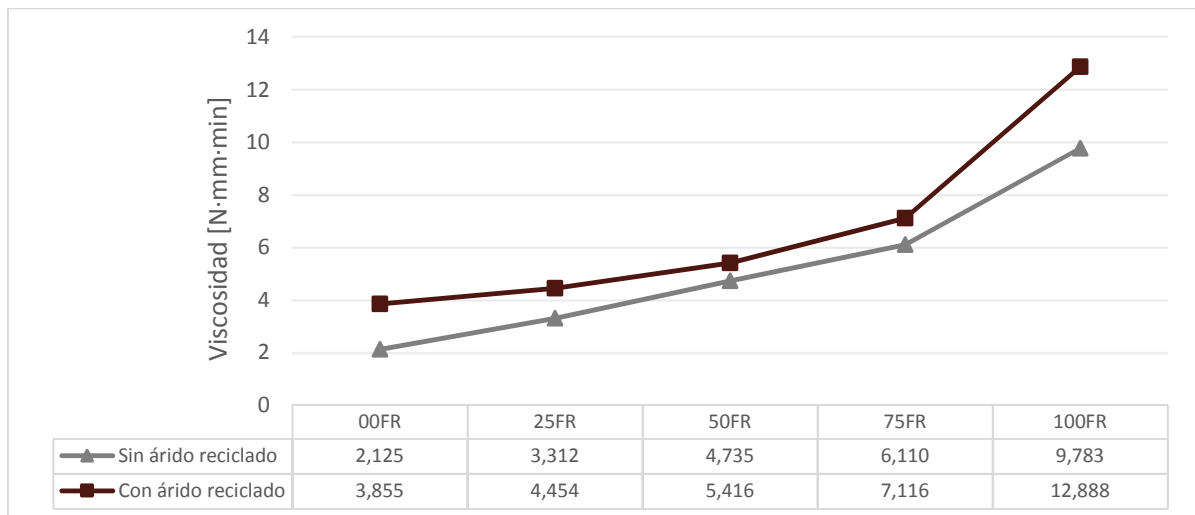


Figura 58. Viscosidad en unidades relativas. FCT 20 minutos

El torque dinámico presenta un comportamiento similar a la viscosidad en función de la cuantía de filler de recuperación, aumentando progresivamente a medida que se aumenta el contenido del residuo.

Una vez más, la presencia de árido reciclado perjudica a la mezcla, elevando el valor del torque dinámico sobre todo en las osificaciones con bajo contenido de filler de recuperación.

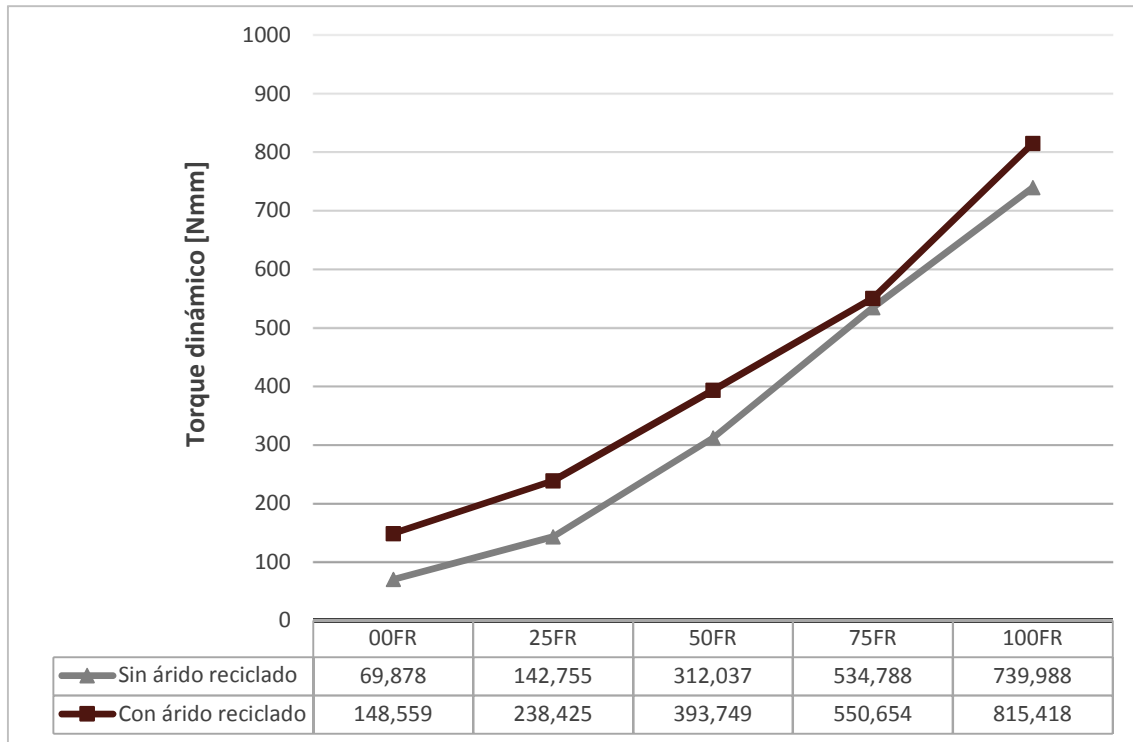


Figura 59. Torque dinámico FCT 7 minutos

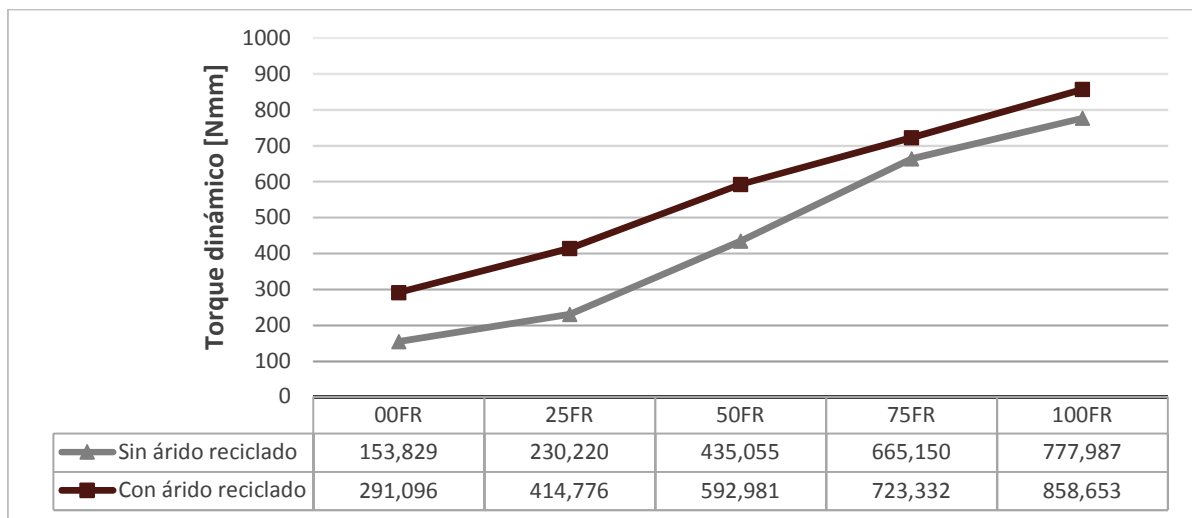


Figura 60. Torque dinámico FCT 20 minutos

5.2. Propiedades en estado endurecido

5.2.1. Retracción

Se realizaron dos probetas por cada dosificación de grout y se obtuvieron lecturas cada 24h los primeros 7 días, cada 48h los siguientes 7 días, y, posteriormente, lecturas cada dos semanas, puesto que las variaciones tanto de peso como de longitud se volvían inapreciables. La toma de datos finalizó alcanzados los 90 días de edad.

Los resultados muestran como el aumento del contenido de filler de recuperación aumenta la retracción sufrida por el grout. A edades tempranas, las diferencias son poco apreciables, sin embargo, a partir de los 7 días de edad, las mezclas con mayor contenido de filler de recuperación incrementan su retracción a un ritmo mayor que las de control. Como era de esperar, todas las probetas muestran un comportamiento de retracción no lineal, disminuyendo a medida que pasa el tiempo (Kurda, Brito and Silvestre, 2019).

Estos resultados no concuerdan con los obtenidos por (Esquinas *et al.*, 2018) y (Esquinas *et al.*, 2017) en los que muestra como la presencia de este tipo de fillers ejercía el efecto contrario, reduciendo la retracción. Cabe mencionar que, en ambos estudios, el filler de recuperación sustituye a un filler silicio, no calizo como en el estudio aquí realizado, por lo que su comportamiento no puede equiparse. En la literatura revisada no se encuentran otros casos de estudio de retracción en mezclas realizadas con este tipo de residuo por lo que será necesario futuros estudios para poder contrastar resultados.

La incorporación de árido reciclado en las mezclas mantiene la misma tendencia que el filler de recuperación debido a su mayor contenido de finos, obteniendo por lo general, mayores valores de retracción la serie con árido reciclado, que la serie sin él. Cabe destacar como las mezclas con árido reciclado y mayor contenido de filler de recuperación aún a 90 días parecen no haber alcanzado el nivel asintótico, por lo que se deberá continuar midiendo la retracción.

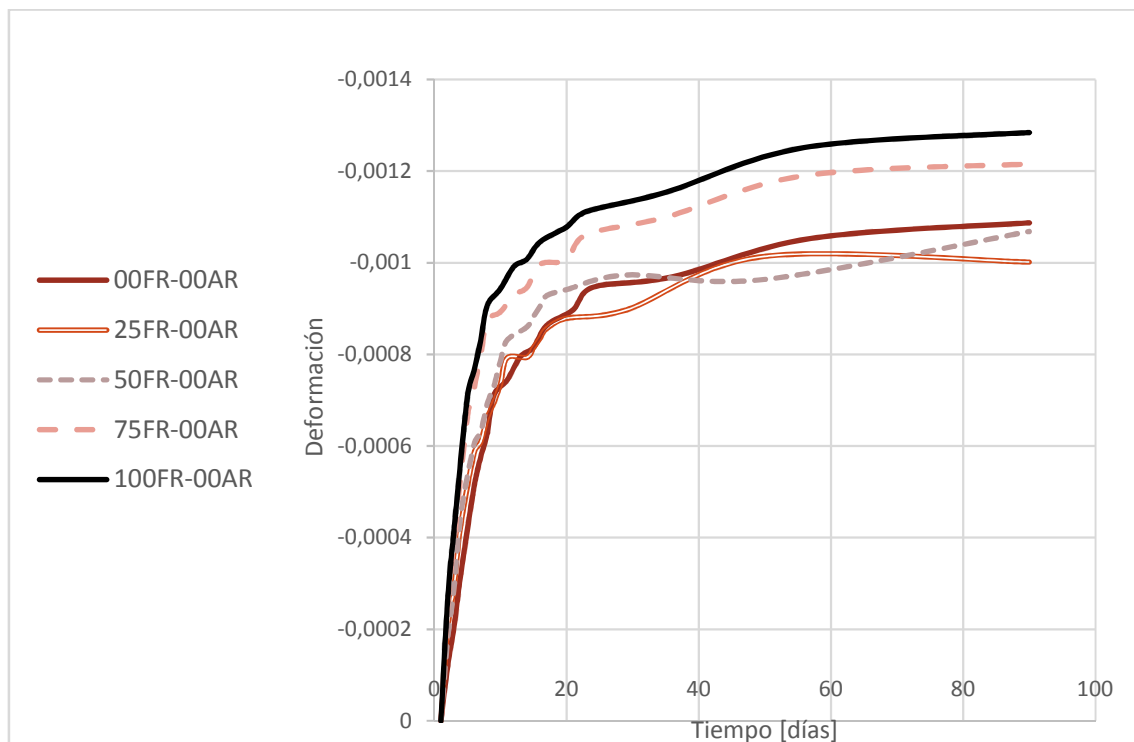


Figura 61. Retracción de las dosificaciones sin árido reciclado

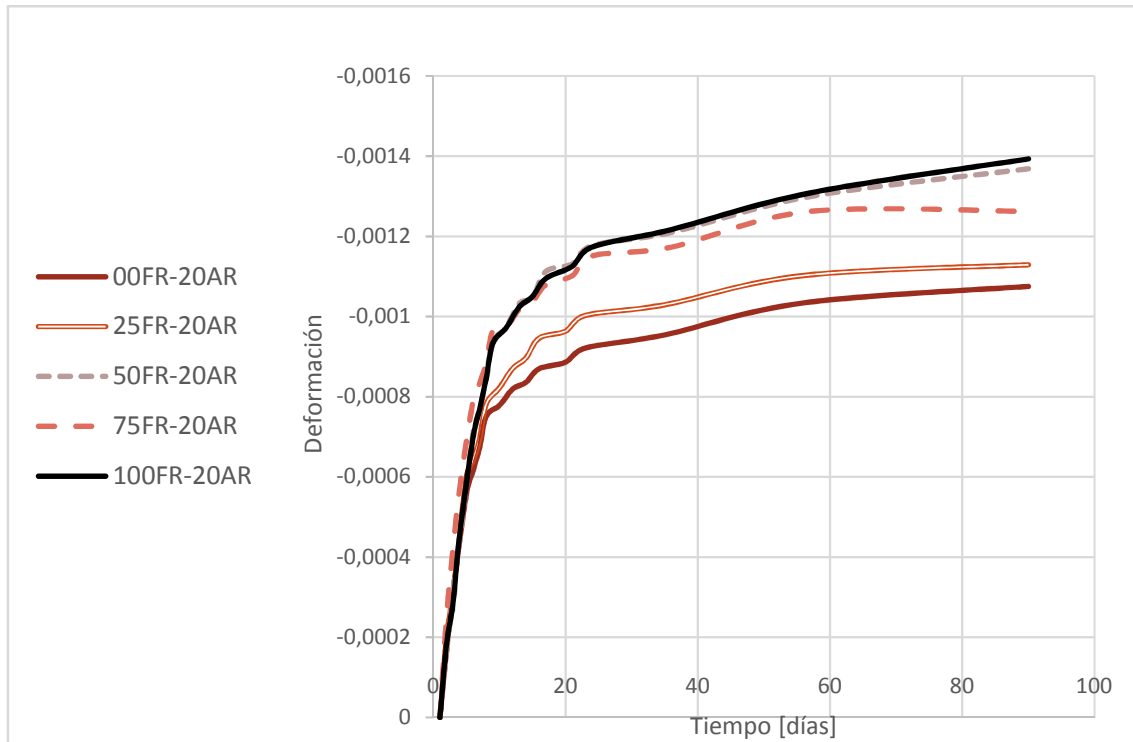


Figura 62. Retracción de las dosificaciones con árido reciclado

La importancia del estudio de la retracción radica en su relación directa con la aparición de fisuras y tensiones internas. Dentro de los múltiples factores anteriormente mencionados, que afectan a este proceso, la relación agua/cemento podría categorizarse como el principal, aumentando la retracción a medida que se incrementa esta relación (Kurda, Brito and Silvestre, 2019). En este estudio las diez dosificaciones fueron realizadas con una relación elevada de agua/cemento (0,61) y en ningún caso se incorporó ningún tipo de aditivo reductor de reducción, lo que justifica los elevados valores de retracción obtenidos.

5.2.2. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se ve afectada negativamente en función de la cantidad de filler de recuperación que se aporte, aunque de un modo mucho menos acentuado que en los ensayos de escurrimiento. Si se sustituye el filler calizo hasta en un 50 %, las resistencias tan solo descienden en un 6%, mientras que, si se sustituye el 100% por filler de recuperación, el descenso pasa a ser del 16,4%.

La incorporación de árido reciclado también reduce los valores de resistencia a compresión, pero en mucha menor medida, resultando despreciables las variaciones en las dosificaciones con ambos residuos. En las dosificaciones sin filler de recuperación, en cambio, la presencia de árido reciclado es más notable, provocando un descenso de las mismas de un 5,4%.

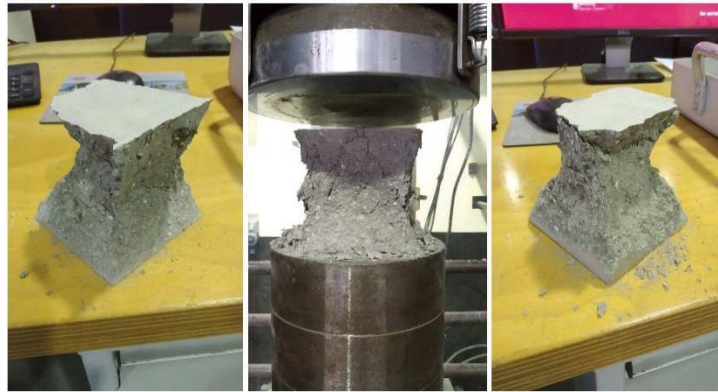


Figura 63. Probetas de grout ensayadas a compresión

Los resultados obtenidos por todas las dosificaciones están por encima de los 15 MPa de mínimo que marca el Eurocódigo 6 (AENOR, 2013) para grouts empleados en el relleno de bloques.

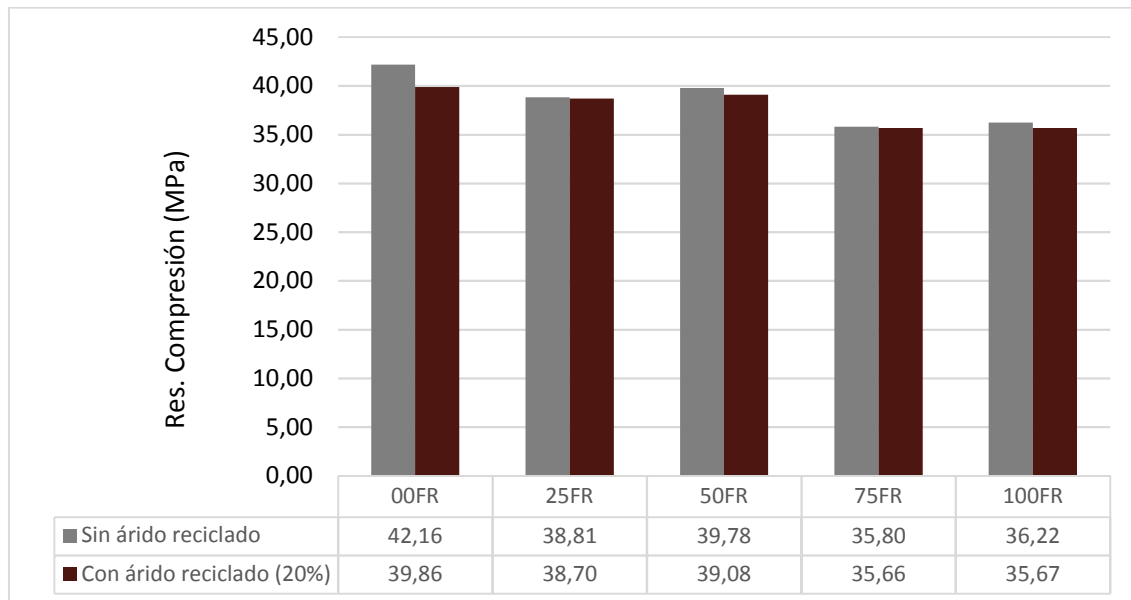


Figura 64. Resistencia a compresión de los distintos grouts a 28 días

En las gráficas siguientes se muestra la evolución de las resistencias en el tiempo, habiendo sido medidas a los 3 días, 7 días y 28 días, separando la serie sin árido reciclado y la serie con un 20% de árido reciclado.

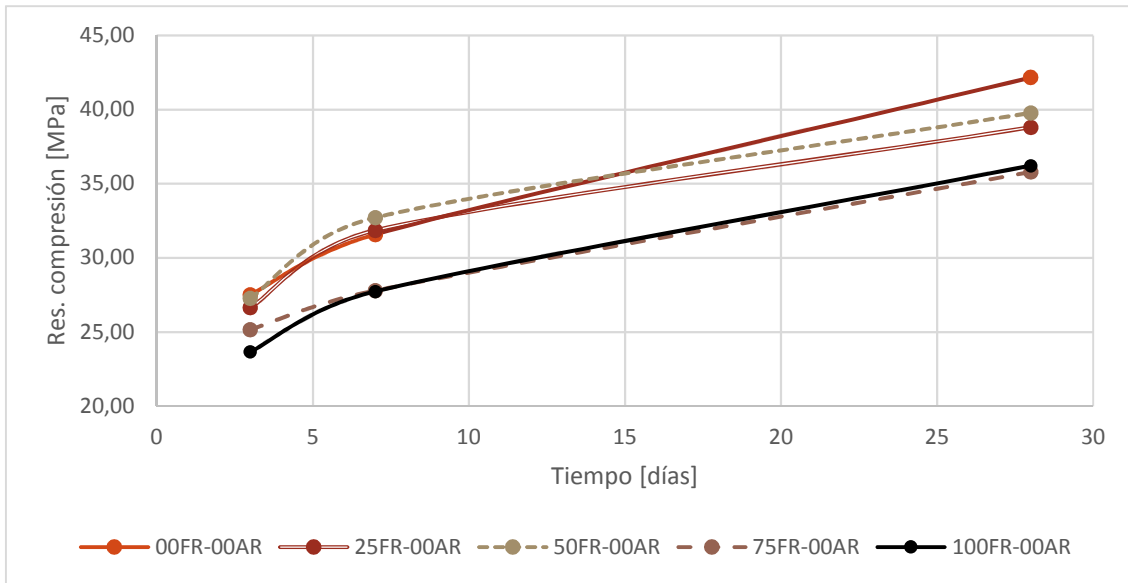


Figura 65. Evolución de las resistencias a compresión de las dosificaciones sin árido reciclado

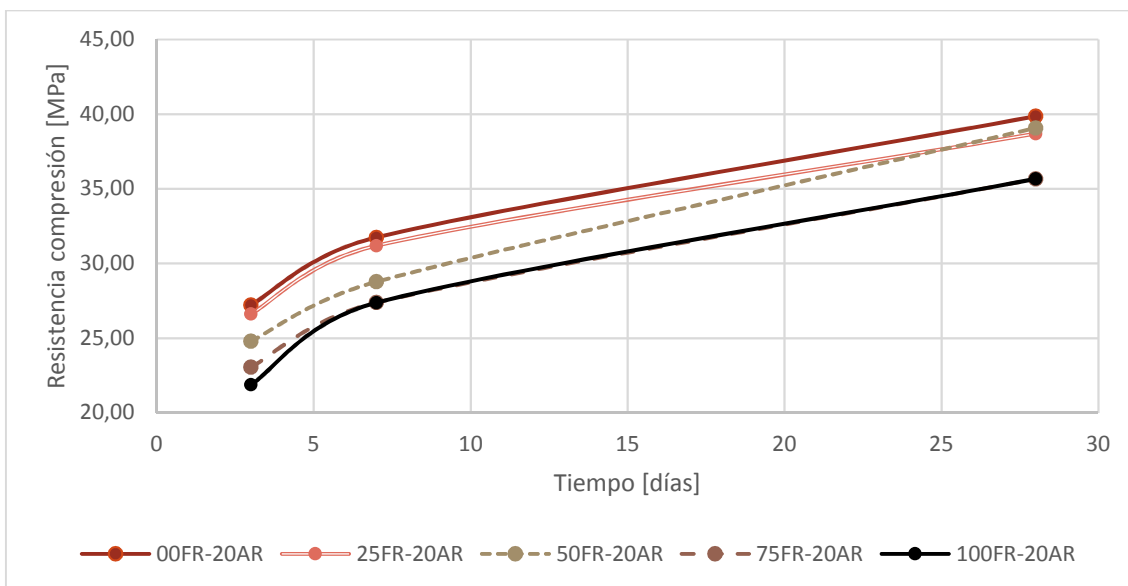


Figura 66. Evolución de las resistencias a compresión de las dosificaciones con árido reciclado

Se aprecia como a cortas edades, se mantienen las mismas diferencias obteniendo las dosificaciones con filler de recuperación menores resistencias que las realizadas con filler calizo. Cabe destacar, que todas las dosificaciones estudiadas, cumplen el requisito de resistencia a compresión mínima ya desde el tercer día.

5.2.3. Control por desplazamiento

La velocidad de carga aplicada en este ensayo es menor que en el ensayo de resistencia a compresión, lo que genera unos valores de carga máxima y deformación pico mayores.

Los resultados de este ensayo muestran las variaciones de deformación sufridas por los distintos grouts en función de la cantidad de residuos incorporada. Tanto la presencia de árido reciclado como de filler de recuperación producen un aumento de las deformaciones, obteniendo una mayor ductilidad las dosificaciones con mayor contenido de residuos. Estos datos serán necesarios para analizar en la siguiente fase el comportamiento conjunto de los bloques de hormigón con los distintos rellenos.

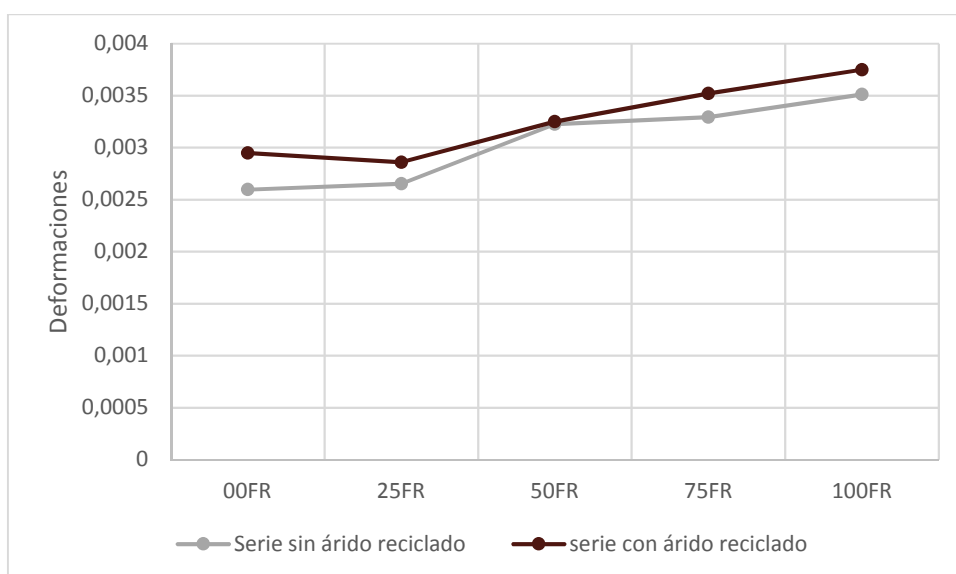


Figura 67. Resultados ensayo control por deformación

5.2.4. Ultrasonidos

Los ensayos de ultrasonidos se realizaron a las probetas destinadas a roturas a compresión. Como se trata de un método no invasivo, no se produce ninguna alteración de estas durante la realización del ensayo.

Debido a un fallo eléctrico en uno de los cables del aparato de ultrasonidos, las mediciones tomadas a 3 y 7 días de edad se eliminan del análisis. La inconsistencia sospechada durante la toma de medidas fue verificada a la hora de tratar los datos obtenidos, y es por ello que solo se incluirán los resultados obtenidos por las mediciones a 28 días, realizadas con la avería supuestamente subsanada.

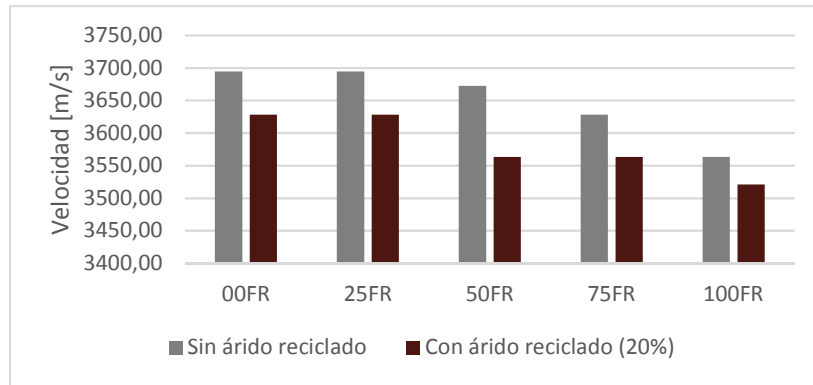


Figura 68. Resultados ensayo ultrasonidos a 28 días

Al no contar con los datos de las lecturas a 3 y 7 días, no se puede comprobar el incremento de velocidad ligado al incremento de resistencias experimentado durante el curado. No obstante, se puede comprobar que los resultados de las mezclas con mayor cantidad de filler de recuperación obtienen menores velocidades, al igual que lo observado por Esquinas y asociados (2017) en sus experimentos.

Con el dato de la velocidad de propagación del pulso, se puede obtener el valor del módulo dinámico de elasticidad por medio de la siguiente relación modificada para no necesitar operar en unidades americanas (Whitehurst, 1951):

$$E = 0,000216 \times 3,28084V^2 \times 62,4279606\rho \times \frac{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \times 0,00689475$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad dinámico [MPa]

ρ : Densidad [g /cm³]

μ : coeficiente de Poisson

V: Velocidad ultrasónica [m/s]

En las tablas siguientes [Tabla 13] [Tabla 14] se muestran los resultados obtenidos por el ensayo:

Grout	Módulo de elasticidad dinámico [MPa]
00FR00AR	26.211,70
25FR00AR	26.180,15
50FR00AR	25.987,28
75FR00AR	25.064,48
100FR00AR	24.126,76

Tabla 13. Módulo de elasticidad dinámico de grouts sin árido reciclado

Grout	Módulo de elasticidad dinámico [MPa]
00FR20AR	24.895,35
25FR20AR	25.033,65
50FR20AR	24.183,93
75FR20AR	23.907,23
100FR20AR	23.396,43

Tabla 14. Módulo de elasticidad dinámico de grouts con árido reciclado

Puede observarse como a tanto la presencia del árido reciclado como del filler de recuperación minoran los valores del módulo elástico dinámico, reduciéndose en un 8% el grout 100FR00AR y en un 11% el grout 100FR20AR.

5.2.5. Módulo de elasticidad secante

El módulo de elasticidad secante es un parámetro de gran utilidad a la hora de caracterizar una mezcla de base cemento, puesto que es un indicativo de seguridad y vida útil a esperar (Esquinas *et al.*, 2017). El valor en sí es una constante que relaciona la tensión a la que está sometida el material ensayado con las deformaciones sufridas durante la rama elástica de la carga.

El módulo elástico se ve afectado negativamente, tanto con la incorporación de filler de recuperación, como con la de árido reciclado, pero de manera distinta a la vista en resistencia a compresión. Esto es debido a que si la rotura se produce por la pasta, el árido no se ve implicado en los resultados de resistencia. Sin embargo, en deformaciones la actuación del árido sí que es notable y así se muestra en [Fig. 69]. Llama la atención como en ausencia de filler de recuperación, el árido reciclado no afecta al valor del módulo. Sin embargo, una vez presentes ambos residuos, los valores descienden en torno al 11% en función del porcentaje de filler sustituido, obteniendo el resultado más bajo, la mezcla con mayor contenido de residuos, con un descenso del 27%.

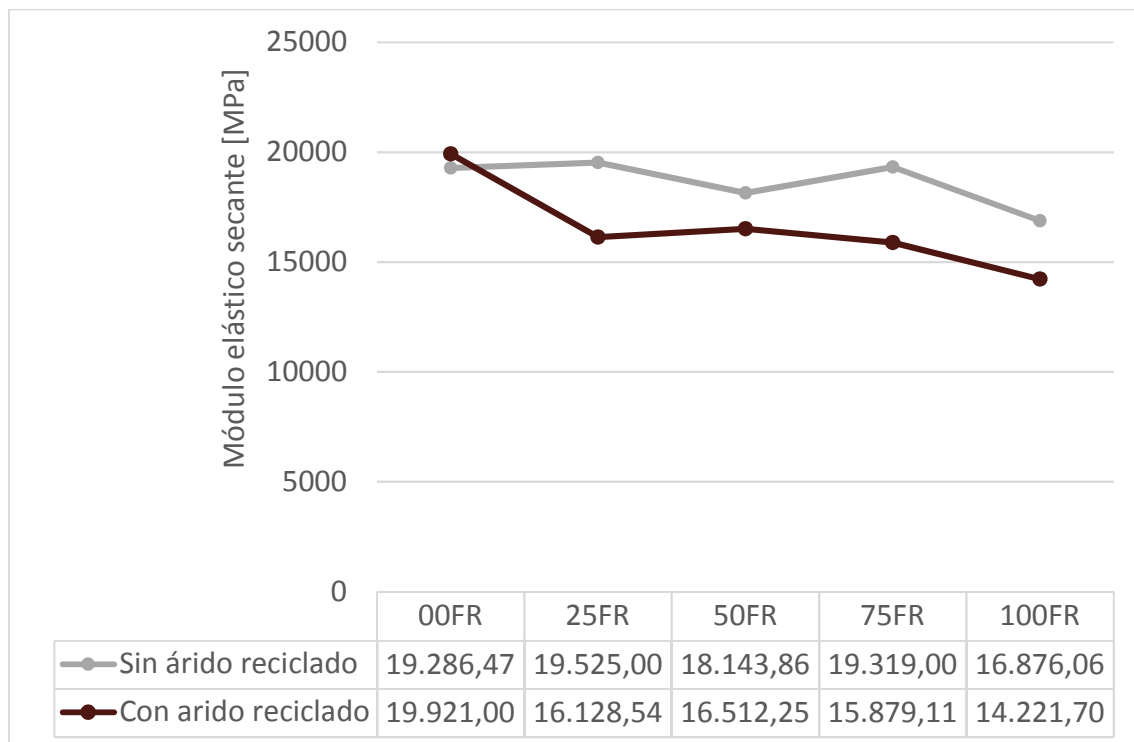


Figura 69. Módulo de elasticidad secante de los distintos grouts

6.CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LA FASE II

6. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE LA FASE II

6.1. Criterios de selección

Al igual que la Fase I, la selección de materiales se vio condicionada por la pertenencia de este trabajo al proyecto de investigación “*Alfiller*”. Es por ello por lo que se decide emplear dos tipos de bloques distintos, y dos tipos de relleno, generando un total de cuatro combinaciones.

Los materiales usados para la segunda fase son:

- Bloques de hormigón convencional de 40 x 20 cm, manufacturado por la empresa Prefhorvisa S.L. (Bloque de 20 NORMAL)
- Bloques de hormigón con un 100% de sustitución de la arena por ceniza de fondo de carbón, procedente de centrales térmicas. Las dimensiones de estos bloques y su procedencia coinciden con la de los bloques convencionales.
- Grout de dosificación 00FR00AR generada en la Fase I, actuando como mezcla de control.
- Grout de dosificación 100FR20AR generada en la Fase I, contando con una sustitución del 100% de filler calizo por filler de recuperación y un 20% de la arena convencional por árido reciclado.
- Mortero autonivelante MORCEM GROUT 500 fabricado por Grupo Puma.

6.2. Bloque convencional: Bloque de 20 NORMAL

Se trata de un bloque hueco de áridos densos con 2 alveolos pasantes y dimensiones nominales de 400 mm de longitud x 200 mm de anchura x 200 mm de altura. Las paredes son de al menos 30mm y posee una resistencia mecánica a compresión media superior a los 6 MPa. Estos datos han sido obtenidos a partir de la ficha técnica del fabricante.

Se realizaron ensayos de resistencia a compresión a dos bloques para comprobar el estado de la remesa enviada, y cerciorarse de que cumplía los datos marcados por la ficha técnica. En efecto, los bloques cumplían los requisitos obteniendo una media de 6,26 MPa.

6.3. Bloque con ceniza de fondo de carbón

Estos bloques son el fruto de otro proyecto de investigación desarrollado por la empresa Prefhorvisa, entre otras, y en el que también participó el grupo gCons de la Universidad de A Coruña. Los bloques empleados también fueron fabricados por la empresa Prefhorvisa y cuentan con las mismas dimensiones que los bloques convencionales, 400 mm x 200 mm y una dosificación similar, con la salvedad de que incluyen en ella, ceniza de fondo producida en las centrales térmicas en sustitución de la arena.

Al igual que en el caso de los bloques convencionales, se realizaron ensayos de resistencia a compresión para comprobar el estado de la remesa enviada, y se obtuvieron resultados de 4,76 MPa, un 24% inferior a los convencionales.

El peso de estos bloques también es ligeramente inferior al de los convencionales, siendo de 13,25 kg frente a los 14 kg de éstos, debido a la menor densidad de las cenizas empleadas.

6.4. Mortero autonivelante

Para refrentar los bloques de hormigón y conseguir una superficie lisa sobre la que poder aplicar las cargas de manera uniforme durante los ensayos, se opta por el mortero MORCEM GROUT 500. Se trata de un mortero autonivelante de altas resistencias, suministrado por la empresa Grupo Puma en sacos de 25kg. Posee un elevado poder autonivelante, unos valores bajos de retracción y una consistencia fluida que facilita su colocación en los bloques. Cuenta con la etiqueta ecológica tipo III.

CARACTERÍSTICAS MORCEM GROUT 500	
Aspecto	Polvo gris
Densidad de la pasta	2,2 g/cm ³
Granulometría	Dmax. 2mm
Relación agua/polvo	13,5 ± 1%
Resistencia a compresión a 1 día	30 MPa
Resistencia a compresión a 28 días	65 MPa
Contenido de iones cloruros	< 0.05%

Tabla 15. Características del mortero autonivelante (Elaboración propia a partir de ficha técnica del fabricante)

7.PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA FASE II

7. PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA FASE II

En esta segunda fase, se analizan las diferencias de comportamiento de los distintos bloques, tanto vacíos como rellenos, frente a esfuerzos de compresión. Para ello, se lleva hasta rotura un total de 12 bloques, 6 convencionales y 6 con cenizas de fondo de carbón, con las siguientes configuraciones:

- 2 bloques convencionales vacíos.
- 2 bloques convencionales rellenos con grout 00FR00AR
- 2 bloques convencionales rellenos con grout 100FR20AR
- 2 bloques con cenizas de fondo de carbón vacíos
- 2 bloques con cenizas de fondo de carbón rellenos con grout 00FR00AR
- 2 bloques con cenizas de fondo de carbón rellenos con grout 100FR20AR

En esta fase se realizan, además, un total de 12 probetas cúbicas de 10 cm de lado para su posterior ensayo a compresión a 28 días. Estas probetas corresponden a los dos tipos de grouts empleados, el 00FR00AR y el 100FR20AR.

7.1. Preparación de los bloques

7.1.1. Relleno

Se realizaron un total de cuatro amasadas de 23 litros, dos de la dosificación 00FR00AR y dos de la dosificación 100FR20AR para llenar un total de 8 bloques. Éstos se colocan dentro de la cámara climática a 22 ± 2 °C y $60 \pm 5\%$ de humedad, para facilitar el proceso de llenado y evitar el transporte una vez rellenos. Terminado el proceso de llenado, se cubren con una lona de plástico y se almacenan durante 28 días.



Figura 70. Proceso de llenado de los bloques de hormigón

En cada amasada, antes de rellenar los bloques, se realizan los ensayos de escurrimiento, *minifunnel* y *minislump*, y se rellenan 3 probetas cúbicas de 10 cm de lado para ser ensayadas a compresión a los 28 días junto con los bloques. Con estos ensayos se pretende comprobar que los valores de la amasada coinciden con los obtenidos en la Fase I.

7.1.2. Refrentado

Para el refrentado de los bloques se siguieron las directrices marcadas por la norma UNE-EN 772-1:2001+A1 (AENOR, 2016a). Además de lo dispuesto en la norma, se consulta a la empresa fabricante de los bloques, Prefhorvisa, y a la empresa Galaicontrol, especializada en ensayos de control de calidad en la construcción, como realizar correctamente el proceso.

Utilizando materiales presentes en el laboratorio de construcción de la Escuela de Caminos, se elaboran encofrados a medida para facilitar el proceso de refrentado. Tras impregnar el encofrado con desencofrante, se mezcla en una amasadora para morteros a baja velocidad, 1,2kg de mortero MORCEM GROUT 500 con 0,176 kg de agua y se mezcla durante dos minutos. A continuación, se vierte una capa de 5mm sobre el encofrado y se posiciona sobre ella el bloque a refrentar, hundiéndolo en la mezcla. Con la ayuda de un nivel de burbuja se comprueba que la ejecución ha sido correcta, y se deja el bloque en el molde durante 24h. Transcurrido el periodo marcado, se procede a desmoldar los bloques y a repetir el mismo proceso por la otra cara a refrentar.

En el caso de los bloques sin relleno, el proceso se mantiene similar, con la salvedad de que se retira el exceso de mortero de los huecos, buscando obtener el menor incremento de superficie en el bloque posible.



Figura 71. Proceso de refrentado de la primera cara de los bloques

7.1.3. Colocación de galgas extensiométricas

El proceso de colocación de galgas es similar al visto en la Fase I para las probetas cúbicas. Se comienza lijando la superficie donde se colocará la galga, se limpia, y se le aplica el adhesivo PS.

Transcurridas 24h, se retira el teflón protector y se pega la galga. Se colocan dos por bloque, en vertical en el centro del lado de 40 cm.



Figura 72. Bloques refrentados y con las galgas ya colocadas

7.2. Resistencia a compresión de los bloques

Los bloques se almacenan en el laboratorio durante un mes, tiempo superior al definido por la norma UNE-EN 772-1:2001+A1:2016 (AENOR, 2016a). Este periodo asegura que todos los bloques cuenten con las mismas condiciones de temperatura y humedad antes del llenado, momento a partir del cual se contará la edad de los mismos.

Para su rotura, se acude de nuevo a las instalaciones del CITEEC y se utiliza la prensa Rock Mechanics Test System 815 de MTS empleada en la Fase I. En este caso, es necesario colocar placas de reparto para conseguir que la carga se distribuya por toda la superficie del bloque de manera uniforme. Estas placas cuentan con un grosor suficiente como para considerarse indeformables frente a las sollicitaciones del ensayo.

En cuanto a la velocidad de aplicación de la carga, la norma UNE-EN 772-1:2001+A1:2016 indica una velocidad de aplicación orientativa en función de la resistencia que se prevé obtener, y garantizando que la duración del ensayo sea siempre superior a un minuto. Para estos ensayos, se estima una resistencia de entre 11 y 20 MPa por lo que la velocidad de carga será de 0,15 MPa/s.

Tras finalizar el ensayo, se registra la carga máxima soportada por cada espécimen, en kN, y la deformación sufrida, medida a través de las galgas extensiométricas y con el apoyo de un módulo HBM y el software Catman.

8.RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA FASE II

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA FASE II

En este capítulo se recogen y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la Fase II del programa experimental.

8.1. Resistencia a compresión

Los resultados de resistencia a compresión de los bloques vacíos coinciden con los aportados por el fabricante, obteniendo una resistencia de 6,26 MPa el bloque convencional y un valor sensiblemente inferior para el bloque con ceniza de fondo de carbón, 4,76 MPa. Estos resultados son calculados con el área bruta de la sección sometida a carga, como se indica en la norma UNE-EN 772-1:2001+A1:2016 (AENOR, 2016a).

En cuanto a los bloques rellenos, todas las combinaciones superan en más de un 100% los valores obtenidos por los bloques vacíos, obteniendo valores comprendidos entre los 12 y los 16 MPa. Llama la atención como precisamente la combinación con mayor presencia de residuos en su dosificación, bloque con ceniza de fondo de carbón relleno con el grout 100FR20AR, obtiene las resistencias a compresión más altas registradas en los ensayos.

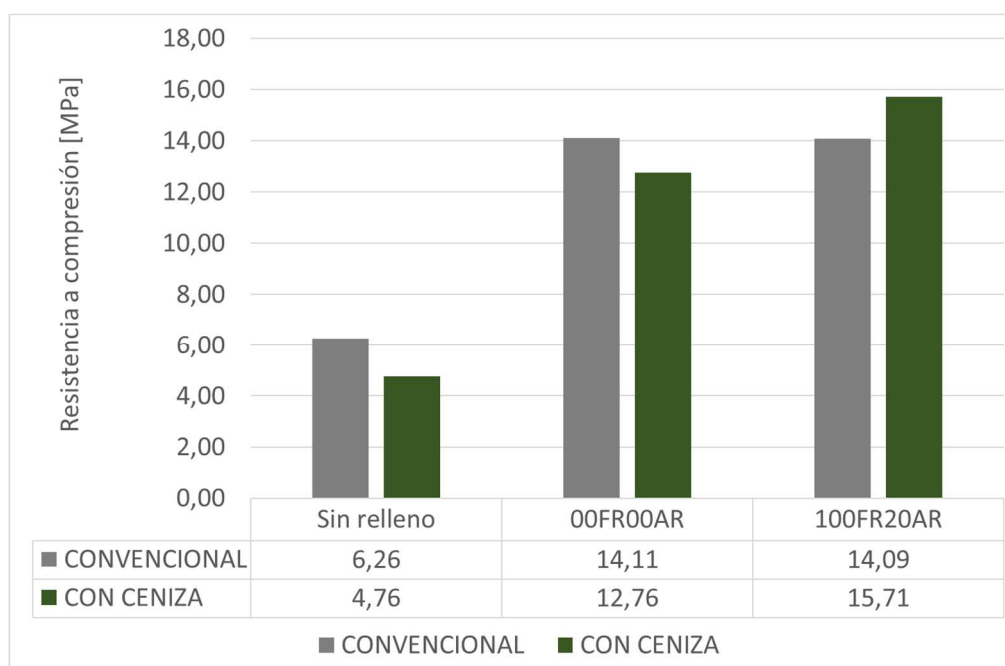


Figura 73. Resultados del ensayo de resistencia a compresión de los bloques rellenos y vacíos

El aumento de resistencia a compresión obtenido por los bloques rellenos de grout frente a los bloques vacíos, confirma los resultados observados en la literatura revisada. Sin embargo, se encuentran ciertas discrepancias. El trabajo de Martins y asociados (2018b) se afirmaba que el incremento de la resistencia de grout no siempre se traducía en un incremento de resistencia del conjunto, pero que incrementar la resistencia del bloque sí que producía siempre un aumento de las resistencias del conjunto. Sin embargo, en este estudio, los bloques convencionales, con un 31% más de resistencia que el bloque realizados con ceniza de fondo de carbón, han obtenido peores resultados al ser rellenos con el grout 100FR20AR.



Figura 74. Bloques rellenos ensayados a compresión

Esto se cree que se debe a que en el estudio de Martins y asociados (2018b), el incremento de la resistencia del bloque se conseguía con bloques de paredes de mayor espesor. Este aumento supone una reducción de las tensiones laterales que produce el grout sobre el bloque por dos motivos: en primer lugar, el aumento de espesor reduce el tamaño del hueco y por lo tanto menos grout se puede verter y menos empuje lateral producirá. Y, en segundo lugar, el aumento de espesor de las paredes les concede a éstas mayor resistencia frente a esas tensiones laterales resistiendo así una mayor carga.

El incremento de resistencia de los bloques aquí estudiados se debe a un cambio en la dosificación, no a un cambio en las dimensiones, y por eso se obtienen comportamientos distintos.

Resistencias a compresión normalizadas

En el Anexo A, de la norma UNE-EN 772-1:2011+A1:2016 (AENOR, 2016a) se especifica como obtener la resistencia a compresión normalizada f_b . Para bloques de hormigón secados al aire, el proceso constará solo de un paso que consiste en multiplicar la resistencia a compresión obtenida en los ensayos por un factor de forma “ d ” que varía en función de la altura y el ancho de la pieza estudiada:

Anchura mm Altura^a mm	50	100	150	200	≥ 250
40	0,80	0,70	–	–	–
50	0,85	0,75	0,70	–	–
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
≥ 250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Tabla 16. Factor de forma "d" para el cálculo de la resistencia a compresión normalizada (AENOR, 2016a).

Puesto que todas las piezas aquí ensayadas poseen las mismas dimensiones 400 x 200 x 200 mm, el valor obtenido de la tabla del coeficiente de forma será $d = 1,25$

	Vacío	Relleno 00FR00AR	Relleno 100FR20AR
BLOQUE 20 NORMAL	7,8	17,6	17,6
BLOQUCON CENIZA	5,9	15,9	19,6

Tabla 17. Resistencias a compresión normalizadas fb

8.2. Deformaciones de los bloques

Como se comentó en el apartado del programa experimental, los bloques fueron dispuestos con dos galgas extensiométricas cada uno, para poder conocer los valores de deformación experimentados durante los ensayos. Los resultados muestran cómo tanto la composición como la incorporación de distintos rellenos, afecta a las deformaciones sufridas por los bloques.

Con el grout 00FR00AR, ambos tipos de bloques sufren variaciones en sus deformaciones con respecto a los bloques vacíos, siendo del 15,84% para los bloques convencionales y del 21,48% para los bloques con ceniza.

Para los bloques rellenos con grout 100FR20AR, los bloques convencionales, obtienen unas deformaciones un 28,79% mayores en comparación con los vacíos, mientras que los bloques de ceniza de fondo de carbón mantienen unos valores casi constantes, sufriendo un aumento de tan solo el 0,19%. Esta compatibilidad de deformaciones, puede ser la causa de sus buenos resultados de resistencia a compresión, como se menciona en la literatura revisada (Drysdale and Hamid, 1979) (Fonseca *et al.*, 2019). Sin embargo, será necesario continuar con las investigaciones para poder afirmar con certeza que elementos y en qué proporción son los responsables del comportamiento del conjunto bloque más grout, y como poder optimizar el conjunto.

9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

9.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos del análisis realizado permiten establecer las siguientes conclusiones:

- El aumento de contenido de filler de recuperación produce un descenso en la trabajabilidad, aunque este descenso es mínimo en porcentajes de sustitución inferiores al 50%. La incorporación de árido reciclado solo es apreciable en porcentajes bajos de sustitución de filler, reduciendo también los valores de trabajabilidad. En valores de sustitución del 75% y del 100% de filler de recuperación, las diferencias entre los grouts con árido reciclado y los grouts sin él son despreciables.
- La presencia de filler de recuperación también aumenta los valores reológicos de los grouts. Tanto la viscosidad como el torque estático y dinámico se ven afectados negativamente en función del porcentaje de filler sustituido. La incorporación de árido reciclado afecta principalmente a las dosificaciones con bajo porcentaje de filler de recuperación (inferior al 50%) aumentando la tixotropía de éstas.
- Tanto los valores de resistencia a compresión, como los valores de retracción también se ven perjudicados a medida que se incrementa el porcentaje de filler de recuperación. No obstante, todos los grouts cumplen con las resistencias mínimas fijadas por el Eurocódigo 6 desde el tercer día de edad, y la diferencia entre el grout de control y el que cuenta con mayor porcentaje de residuos es de tan solo un 16%.
- La incorporación de árido reciclado no ejerce efectos apreciables en los grouts en cuanto a resistencias se refiere. Sin embargo, los grouts que contienen este residuo obtuvieron peores resultados en el ensayo de retracción.
- En cuanto al comportamiento de los bloques de hormigón, el efecto del grout depende del tipo de bloque usado. Para los bloques convencionales, no se aprecia diferencias de resistencia a compresión entre bloques rellenos con el grout de control y bloques rellenos con grout con filler de recuperación y árido reciclado. Sin embargo, para los bloques realizados con ceniza de fondo de carbón, se aprecia una notable mejora utilizando el grout con residuos.
- Todas las roturas de los bloques muestran la actuación de ambos materiales en conjunto. Sin embargo, existe un comportamiento más homogéneo en la combinación de bloque de ceniza de fondo de carbón con el grout 100FR20AR.

En definitiva, la solución constructiva de bloque de ceniza de fondo de carbón con filler de recuperación y árido reciclado, presenta un comportamiento adecuado cuyo uso supondría, además, avanzar en la línea de la Economía circular en el sector de la construcción.

9.2. Futuras líneas de investigación

9.2.1. Mejora de la trabajabilidad del grout 100FR20AR

Una vez conocidos los resultados de las fases anteriores y comprobando que los mejores resultados a compresión fueron obtenidos por los bloques de ceniza con el grout 100FR20AR, se repetirían los ensayos realizados aumentando en esa última dosificación la cantidad de superplastificante, con el fin mejorar la trabajabilidad de la mezcla (Martín *et al.*, 2013) y mejorar su colocación en los bloques. Una vez conseguida la consistencia adecuada, se estudiará tanto la resistencia del propio grout como su comportamiento como relleno, comprobando si se mantienen las resistencias a compresión y si las deformaciones siguen siendo compatibles.

9.2.2. Diseño de morteros de revestimiento con FR

Los morteros de revestimiento se pueden emplear tanto para paramentos interiores como exteriores, y tanto verticales como horizontales. Se elaborarán según lo dispuesto en la norma UNE EN-998-1:2018 incluyendo el filler de recuperación en su composición.

Una vez conseguida la dosificación adecuada y calculado el mayor contenido posible de filler de recuperación, se realizarán los siguientes ensayos:

- Tiempo abierto de trabajabilidad (Norma-EN 1015-9)
- Contenido de aire (Normas EN 1015-6 y EN 1015-7)
- Clasificación en función de la reacción al fuego en caso de contar con un porcentaje de materia orgánica superior al 1% en masa o volumen, eligiendo el valor más desfavorable (Norma EN 13501-1:2019)
- Resistencia a compresión (Norma EN 1015-11)
- Adhesión (Norma EN 1015-12)
- Transmitancia térmica (Norma EN 1745:2013)

9.2.3. Diseño de bloques de hormigón con FR

La incorporación del filler de recuperación al campo de la prefabricación aporta entre otros, dos beneficios principales. En primer lugar, como se ha podido comprobar es este trabajo y en la literatura revisada (Martín *et al.*, 2013; Esquinas *et al.*, 2017), la incorporación de filler de recuperación genera hormigones de consistencias más secas, no deseadas en obra pero sí en el sector de la prefabricación por facilitar y agilizar el proceso de desmoldeo. En segundo lugar, la incorporación de materiales finos, como el filler, proporcionará un mejor acabado a los elementos fabricados.

Es por ello que se diseñarán dosificaciones que incorporen filler de recuperación para la elaboración de bloques de hormigón. Éstos serán ensayados a compresión de acuerdo con la norma UNE-EN 772-1:2011, tanto vacíos como rellenos de los grouts diseñados en las fases anteriores. También serán ensayados según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 772-11:2011 para conocer la absorción de agua por capilaridad de éstos.

9.2.4. Diseño de una solución constructiva de muros de bloques de hormigón

Se elaborarán muros prototipo para la implementación directa de los materiales creados en las fases anteriores y comprobar su efectividad en conjunto. En primer lugar, se realizará el ensayo para conocer la resistencia a penetración de CO₂ en el grout, por el método de carbonatación acelerada según la norma UNE 112011:2011. En segundo lugar, se ensayará la adherencia entre grout y acero, realizando ensayos de *pull-out*, de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 12504-3:2006.

A continuación, se construirán varios muros de bloques armados utilizando tanto los bloques como los grouts elaborados con filler de recuperación, así como los morteros de albañilería y revestimiento. Se realizará el vertido desde varias alturas distintas para comprobar la influencia de la altura de vertido y calcular la máxima recomendada. También se calculará la transmitancia térmica del conjunto siguiendo la norma UNE-EN 12667:2002 y se elaborarán fichas técnicas de los productos para facilitar su posterior comercialización.

10. BIBLIOGRAFÍA

10. BIBLIOGRAFÍA

AENOR Véase ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN

Agyekum, K. (2018) 'State of the art review of current literature and development studies on recycled aggregate concrete' *Technical Act Corviniensis Bulletin of Engineering*, XI (3), pp. 121–135.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, COMMITTEE 116 (2005) *ACI 116R-00 Cement and Concrete Terminology*. Farmington Hills (Michigan): ACI.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, COMMITTEE 238 (2014), *ACI 238.2T-14 TechNote Concrete Thixotropy*, Farmington Hills (Michigan): ACI.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (2019) *ASEFMA anuncia un incremento del 5,6% en el consumo de betún para mezclas asfálticas en 2018, 15 puntos por debajo de las previsiones*. Disponible en: <http://www.asefma.es/asefma-anuncia-un-incremento-del-56-en-el-consumo-de-betun-para-mezclas-asfalticas-en-2018-15-puntos-por-debajo-de-las-previsiones/> [Consultado 03-09-2019]

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1999a) *UNE-EN 1015-6:1999 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1999b) *UNE-EN 933-2/1M:1999 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2000) *UNE-EN 1015-3:2000 Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2009a) UNE-EN 12390-2:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2009b) UNE-EN 12390-3:2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2011) UNE-EN 12350-9:2011 *Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2012) UNE-EN 933-1:2012 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2013) UNE-EN 1996-1-1:2011+A1:2013 *Eurocódigo 6: Proyectos de estructuras de fábrica. Parte 1-1*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2014a) UNE-EN 1097-6:2014 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2014b) UNE-EN 12390-13:2014 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2016a) UNE-EN 772-1:2011+A1:2016 *Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*. Madrid: AENOR.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2016b) UNE 80112:2016 *Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua*. Madrid: AENOR.

Atkinson, R. H. y Kingsley, G. R. (1985) "Report nº 1.1-1. A comparison of the behavior of clay and concrete masonry in compression" En *US-Japan Coordinated Program for Masonry Building Research*, Disponible en: <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/PB93212876.pdf> [Consultado 03-09-2019]

Banfill, P.F.G. (2011) 'Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing waterreducing admixtures', *Construction and Building Materials*, 25(6), pp. 2955–2960. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.001

Bonen, D., Deshpande, Y., Olek, J., Shen, L., Struble, L., Lange, D. y Khayat, K. (2007) 'Robustness of Self-Consolidating Concrete' en *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Ghent, 3-5 September, p. 33-42.

Camacho, J. S., Logullo, B.G., Parsekian, G.G., y Soudais, P.R.N. (2015) 'The influence of grouting and reinforcement ratio in the concrete block masonry compressive behavior' *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 8(3), pp. 341–352.

Castillo-Mingorance, J. M., Martínez-Echevarría Romero, M., Rodríguez Montero, J. y López Alonso, M. (2018) 'Caracterización mecánica y reológica de un hormigón autocompactante elaborado con finos de recuperación procedentes de la fabricación de mezclas asfálticas' En *HAC 2018, V Congreso Iberoamericano de hormigón autocompactable y hormigones especiales*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València. 589-598. doi: 10.4995/HAC2018.2018.5320.

COMISIÓN EUROPEA (2015) *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614> [Consultado 03-09-2019]

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN (2011). *EHE-08: Instrucción de hormigón estructural: con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del Hormigón*. 5ª ed. Madrid: Ministerio de Fomento.

Cremades, S. (2011) *Estudio de la robustez en el hormigón autocompactante con bajo contenido de finos*. Trabajo fin de grado. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia

Dehwah, H. A. F. (2012) 'Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash', *Construction and Building Materials*, 26(1), pp. 547–551. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.056.

Drysdale, R.G. y Hamid, A.A. (1979) 'Behavior of Concrete Block Masonry Under Axial Compression', *Journal Proceedings*, 76(6), pp. 707-722. doi: 10.14359/6965.

Erdem, K., Khayat, K. H. y Yahia, A. (2009) 'Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar', *ACI Materials Journal*, 106(2), pp. 154-160.

Esquinas, A. R., Ramos, C., Jiménez, J.R., Fernández, J.M. y Brito, J.de (2017) 'Mechanical behaviour of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants', *Construction and Building Materials*, 131, pp. 114–128. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.063.

Esquinas, A. R., Álvarez, J.I., Jiménez, J.R., Fernández, J.M. y Brito, J.de (2018) 'Durability of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants', *Construction and Building Materials*, 161, pp. 407–419. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.142.

Fathifazl, G., Razaqpur, A.F., Isgor, O.B., Abbas, A., Fournier, B. y Foo, S. (2011) 'Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate', *Cement and Concrete Composites*, 33(10), pp. 1026–1037. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.08.004.

Felekoglu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A y Uyulgan, B. (2006) 'The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars', *Cement and Concrete Research*, 36(9), pp. 1719–1726. doi:10.1016/j.cemconres.2006.04.002.

Ferraris, C. F. y Brower, L. E. (2003) 'Comparison of Concrete Rheometers', *Concrete International*, 25(8), pp. 41–47.

Fonseca, F. S., Fortes, E.S., Parsekian, G.A. y Camacho, Jefferson S.(2019) 'Compressive strength of high-strength concrete masonry grouted prisms', *Construction and Building Materials*, 202, pp. 861–876. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.037.

Fonseca, F. S., Watterson, S. M. y Siggard, K. (2016) 'Compressive and Time-Dependent Strength of Concrete Masonry Constructed with Type M Mortar and Grouts Containing High Volume of Fly Ash and Slag', *ACI Materials Journal*, (113), pp. 185–196. doi: 10.14359/51688638.

Fonseca, F. S., Godfrey, R. C. y Siggard, K. (2015) 'Compressive strength of masonry grout containing high amounts of class F fly ash and ground granulated blast furnace slag', *Construction and Building Materials*, 94, pp. 719–727. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.115.

Georgiadis, A. S., Sideris, K. K. y Anagnostopoulos, N. S. (2010) 'Properties of SCC Produced with Limestone Filler or Viscosity Modifying Admixture', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(4), pp. 352–361. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000030.

González-Fonteboa, B. y Martínez-Abella, F. (2005) 'Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties', *Materiales de construcción*, 55(279), pp. 53-66.

González-kunz, R. N. , Pineda, P., Bras, A. y Morillas, L. (2017) 'Plant biomass ashes in cement-based building materials . Feasibility as eco-efficient structural mortars and grouts', *Sustainable Cities and Society*, 31 (May), pp. 151–172. doi: 10.1016/j.scs.2017.03.001.

Hamid, A., Bolhassani, M., Turner, A., Minaie, E. y Moon, F.L. (2013) 'Mechanical properties of ungrouted and grouted concrete masonry assemblages, En *12th. Canadian Masonry Symposium*, Vancouver, June 2-5 2013. doi:10.13140/RG.2.1.3529.7443.

Huang, L., Liao, L., Yan, L. y Yi, H.(2014) 'Compressive Strength of Double H Concrete Block Masonry Prisms', *Journal of Materials in Civil Engineering*,26(8), pp. 28–31. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.

Idiart, A. E., Lopez, C. M. y Carol, I. (2006) 'Análisis meso-estructural de la retracción por secado del hormigón', *Anales de Mecánica de la Fractura*, 1, pp. 135–140.

INTERNATIONAL MASONRY INSTITUTE (2009) 'Masonry Grout', *Technology Brief*, (August). Disponible en: http://imiweb.org/wp-content/uploads/2015/10/IMI_TB_MASONRY.GROUT_10.6.09.pdf [Consultado 03-09-2019]

Khouadjia, M. L. K., Belebchouche, C. y Bensaci-Chibane, L. (2019) 'Characterization fo recovery filler from hot-mix asphalt plants and its effect on the workability and compressive strength of concrete', *Rusian Journal of Building Construction and Architecture*, 3(43), pp. 59-71. doi: 10.25987/VSTU.2019.3.43.005.

Kurda, R., Brito, J. de y Silvestre, J. D. (2019) 'Concrete with High Volume of Recycled Concrete Aggregates and Fly Ash : Shrinkage Behavior Modeling', *ACI Materials Journal*, 116 (1). doi:10.14359/51710964.

Lai, M., Hanzic, L. y Ho, J. C. M. (2018) 'Fillers to improve passing ability of concrete', *Structural Concrete*, 20(1), pp. 1–13. doi:10.1002/suco.201800047.

Maaruf, A. y Abba, S. I. (2018) 'Self-Compacting Concrete – A Review', *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 6(8), pp. 1-7.

Martín, J., Rodríguez Montero, J., Moreno, F., Piqueras Sala, J.L. y Rubio, M.C. (2013) 'Feasibility analysis of the reuse of waste filler of bituminous mixtures for the production of self-compacting concrete', *Materials and Design*, 46, pp. 372–380. doi:10.1016/j.matdes.2012.10.009.

Martins, R.O.G., Alvarenga, R.C.S., Pedroti, L.G., Oliveira, A.F., Mendes, B.C., y Azevedo, R.G. (2018) 'Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test', *Construction and Building Materials*, 159, pp. 261–268. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.111.

Martins, R.O.G., Nalon, G. H., Alvarenga, R.C.S., Pedroti, L.G., y Ribeiro, J.C.L.(2018) 'Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms', *Construction and Building Materials*, 182, pp. 233–241. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091.

Meyer, C. (2013) 'The Greening of the Concrete Industry', En *The 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM12)*, Jeju, Korea, September 8-12, 2013, pp. 79-92. Disponible en: http://www.i-asem.org/publication_conf/asem13/003.pdf [Consultado 03-09-2019]

MINISTERIO DE FOMENTO (2009) *Documento Básico SE-F: Seguridad estructural: Fábrica*. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadEstructural/DBSE-F.pdf> [Consultado 03-09-2019]

Mohamad, G., Fonseca, F.S., Vermeltfoort, Ad.T., Martens, D.R.W. y Lourenço, P.B. (2017) 'Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths', *Construction and Building Materials*, 134, pp. 489–496. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.112.

NORMABLOC (2008) *Manual Técnico*. Disponible en: <http://www.barruca.es/sites/default/files/manual-tecnico-normabloc.pdf> [Consultado 03-09-2019]

NORMABLOC (2007) *Código de buenas prácticas*. Disponible en: <http://www.eiros.es/UserFiles/eiros/pdf/BLOQUES-CodigodebuenapracticaNORMABLOC.pdf> [Consultado 03-09-2019]

Okamura, H. y Ouchi, M. (2003) 'Self-Compacting Concrete', *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), pp. 5–15.

Rial-Gerpe, Y. (2019) *Influencia de los morteros inorgánicos en las propiedades de los morteros de cemento*. Proyecto técnico. Universidade da Coruña. A Coruña

Rojo-Lopez, G. (2013) *Desarrollo de un dispositivo de análisis reológico del hormigón*. Proyecto técnico. Universidade da Coruña. A Coruña

Seara-Paz, S. (2015) *Efecto de las deformaciones diferidas sobre la respuesta estructural a flexión y análisis del comportamiento adherente del hormigón reciclado*. Tesis doctoral. Universidade da Coruña.

Shein, A.M, M. (2007) *Rheological Modelling of Self-Compacting* . Tesis doctoral. University of Singapore. Singapore

Sümer, M. (2007) 'Filler and superplasticizer usage on high strength concrete', *Materiales de construcción*, 57, pp. 75–80.

Vandamme, M. and Ulm, F. (2009) *Nanogranular origin of concrete creep*. Disponible en: <https://www.pnas.org/content/pnas/106/26/10552.full.pdf> [Consultado 03-09-2019]

Whitehurst, E. A. (1951) *The Soniscope — a Device for Field Testing of Concrete*. Disponible en: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3009&context=roadschool> [Consultado 03-09-2019]

Yehia, S., Helal, K. Abusharkh, A., Zaher, A. y Istaitiyeh, H. (2015) 'Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete', *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Korea Concrete Institute, (May). doi:10.1007/s40069-015-0100-0.

Zohreh, J., Das, S. y Banting, B. (2017) 'Effect of grout strength and block size on the performance of masonry beam', *Construction and Building Materials*, 157, pp. 685–693. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.130.