



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Viabilidad estructural del hormigón reforzado con fibras sintéticas multi-reciclado

Trabajo realizado por:

Dorca B. Peralta Martínez

Dirigido por:

Albert de la Fuente Antequera

Nikola Tošić

Màster en:

Ingeniería Ambiental

Barcelona, **septiembre 2021**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos aquellos que me han ayudado a llegar hasta aquí. Todas esas personas que participaron de una forma u otra e hicieron posible este proyecto, muchas gracias por su apoyo.

En particular, quiero agradecer a mis tutores, Albert de la Fuente y Nikola Tošić, por su apoyo, paciencia e indicaciones dadas durante todo este proceso.

A los técnicos y colaboradores del Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales, que han trabajado conmigo en toda la ejecución de los ensayos, estando siempre a disposición cuando se les ha necesitado.

A mi familia, mis padres y hermanas; que me han apoyado en todo momento, a pesar de estar lejos, dándome ánimos y creyendo siempre en mí.

A mi segunda familia, los que me acogieron en su hogar, pero sobre todo en su corazón, a mi llegada a Barcelona. Para ellos me faltan palabras de gratitud, porque son ellos los que han tenido que soportar la “peor” parte de mí en todo este proceso, pero aun así han sido pacientes y me han dado apoyo y ánimo hasta el final.

Gracias a todos.

RESUMEN

El sector de la construcción es considerado el mayor consumidor de recursos naturales no renovables, al mismo tiempo se encuentra entre los que más residuos producen en Europa, generando con ello importantes impactos sobre el medio ambiente. Los impactos negativos asociados al sector de la construcción se pueden aliviar gestionando de forma eficiente los residuos generados. La valorización y reciclado de estos residuos se exhibe como una gran oportunidad para transformar el sector y hacerlo más sostenible, utilizándolos como materiales secundarios que puedan ser reincorporados a la actividad constructiva, en el marco de la economía circular.

El hormigón reforzado con fibras (FRC) es aquel que incluye en su matriz contiene fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, cuyo fin es mejorar algunas prestaciones, ya sea en estado fresco, primeras edades o en estado endurecido. El ACI (American Concrete Institute) lo define como aquel hormigón compuesto mayoritariamente por cemento hidráulico, áridos y fibras discretas como refuerzo, procedentes de materiales como el acero, vidrio, polímeros orgánicos (fibras sintéticas) o de origen natural (amianto, yute).

En las últimas décadas el empleo de hormigón reforzado con fibras (fibre reinforced concrete, FRC) se está generalizando en el mundo de la construcción a escala internacional. Ya es habitual ejecutar con este material obras de soleras y pavimentaciones industriales, hormigones proyectados para túneles, taludes y ejecución de piscinas, hormigones prefabricados, etc. También está incrementando el uso de FRC en elementos estructurales en edificación como forjados. Aunque las investigaciones anteriores solo se han centrado en las ventajas de la aplicación de FRC, no existe una estrategia sobre el tratamiento de FRC después del período de servicio. En este sentido, desde el punto de vista de la sostenibilidad, el tratamiento de FRC después del período de servicio de las estructuras de hormigón debería ser uno de los temas importantes en un futuro próximo.

Para aliviar esta situación, esta Tesis pretende demostrar la viabilidad del multireciclaje de hormigones reforzados con fibras poliméricas para su uso estructural. Para esto, se plantea una campaña experimental de tres generaciones de hormigón, la primera fabricada con árido natural y las dos siguientes fabricadas con sustitución del 100% de árido reciclado grueso precedente de la generación anterior. Adicionalmente se plantean métodos de prueba para la determinación del contenido de fibras y microplásticos presentes en el árido reciclado.

Una vez finalizada la campaña se pudo extraer las siguientes conclusiones generales: la calidad del árido grueso se degrada, a medida que aumenta el número de repeticiones, presentando menor densidad y mayor absorción. A pesar de las pérdidas de resistencia a medida que aumenta el número de ciclos de reciclaje, todos los hormigones alcanzaron valores de resistencia a la compresión por encima de 20 MPa. La caída de la resistencia a compresión no se trasladó directamente a la resistencia a tracción entre las generaciones. La pérdida del módulo de elasticidad, después de tres ciclos de reciclaje, no superó el 35%.

Además, se demostró que existe una resistencia residual, incluso en los hormigones sin incorporación nueva de fibras, debido a la presencia de fibras incorporadas a través del árido. Esto sugiere la existencia de un refuerzo “colateral” con la incorporación de áridos con fibras.

Los resultados de esta Tesis indican que el árido reciclado obtenido por el reciclaje de FRC, se puede considerar como un árido reciclado con propiedades especiales y ventajosas para un uso estructural. Los resultados de esta Tesis pueden ayudar a los fabricantes de elementos de FRC, en cómo considerar el final de la vida útil de esas construcciones, y a las plantas de reciclaje de hormigón, en cómo tratar, almacenar y vender áridos reciclados con fibras.

ABSTRACT

The construction sector is considered the largest consumer of non-renewable natural resources, at the same time it is among those that produce the most waste in Europe, thereby generating significant impacts on the environment. The negative impacts associated with the construction sector can be alleviated by efficiently managing the waste generated. The recovery and recycling of these wastes is exhibited as a great opportunity to transform the sector and make it more sustainable, using them as secondary materials that can be reincorporated into construction activity, within the framework of the circular economy.

Fiber-reinforced concrete (FRC) is one that includes in its matrix contains short, discrete and randomly distributed fibers in its mass, the purpose of which is to improve some performance, either in fresh condition, early ages or in hardened condition. The ACI (American Concrete Institute) defines it as concrete composed mainly of hydraulic cement, aggregates and discrete fibers as reinforcement, from materials such as steel, glass, organic polymers (synthetic fibers) or of natural origin (asbestos, jute).

In recent decades, the use of fiber-reinforced concrete has become widespread in the world of construction on an international scale. It is now common to use this material to carry out works of slabs and industrial flooring, concrete projected for tunnels, slopes and execution of swimming pools, precast concrete, etc. The use of FRC is also increasing in structural elements in buildings such as floors. Although previous research has only focused on the benefits of applying FRC, there is no strategy on treating FRC after the service period. In this regard, from a sustainability point of view, the treatment of FRC after the service period of concrete structures should be one of the important topics in the near future.

To alleviate this situation, this Thesis aims to demonstrate the viability of multi-recycling fiber-reinforced concrete with polymeric fibers for structural use. For this, an experimental campaign of three generations of concrete is proposed, the first made with natural aggregate and the next two manufactured with replacement of 100% recycled coarse aggregate from the previous generation. Additionally, test methods are proposed to determine the content of fibers and microplastics present in the recycled aggregate.

Once the campaign was over, the following general conclusions could be drawn: the quality of the coarse aggregate degrades as the number of repetitions increases, presenting lower density and higher absorption. Despite the loss of strength as the number of recycling cycles increases, all the concretes achieved compressive strength values above 20 MPa. The drop in compressive strength did not carry over directly to tensile strength between generations. The loss of the modulus of elasticity, after three recycling cycles, did not exceed 35%.

In addition, it was shown that there is a residual tensile strength, even in concretes without new incorporation of fibers, due to the presence of fibers incorporated through the aggregate. This suggests the existence of a “collateral” reinforcement with the incorporation of aggregates with fibers.

The results of this Thesis indicate that the recycled aggregate obtained by recycling FRC can be considered as a recycled aggregate with special and advantageous properties for structural use. The results of this Thesis can help manufacturers of FRC elements, in how to consider the end of the useful life of these constructions, and concrete recycling plants, in how to treat, store and sell recycled aggregates with fibers.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos.....	3
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	3
2.1. Residuos de construcción y demolición (RCD).....	3
2.1.1. Generación y composición de los RCD.....	5
2.1.2. Gestión y marco regulador de los RCD.....	7
2.2. Árido reciclado	9
2.2.1. Definición y tipología.....	9
2.2.2. Propiedades de los áridos reciclados	11
2.3. Hormigón con árido reciclado	12
2.3.1. Ámbito normativo para hormigones reciclados	12
2.3.2. Propiedades mecánicas del hormigón reciclado.....	13
2.3.2.1. Resistencia a compresión (f_c).....	13
2.3.2.2. Resistencia a tracción (f_{ct})	13
2.3.2.3. Módulo de elasticidad (E_c).....	14
2.4. Hormigón reforzado con fibras.....	14
2.4.1. Influencia de las fibras en hormigones	15
2.4.1.1. Resistencia residual.....	16
2.4.1.2. Resistencia a compresión	16
2.4.1.3. Durabilidad.....	16
2.5. Hormigón multireciclado y reciclaje de FRC	17
3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL	19
3.1. Programa experimental	19
3.2. Materiales utilizados	20
3.2.1. Cemento.....	20
3.2.2. Árido natural.....	20
3.2.3. Árido reciclado	21
3.2.4. Fibras	22
3.2.5. Aditivos	22

3.3.	Metodología de ensayos.....	23
3.3.1.	Generación y caracterización del árido reciclado.....	23
3.3.2.	Caracterización del hormigón.....	24
3.3.3.	Contenido de fibras y detección de microplásticos	27
3.4.	Dosificación	29
3.5.	Fabricación.....	31
4.	RESULTADOS.....	33
4.1.	Caracterización del árido reciclado.....	33
4.1.1.	Obtención del árido reciclado.....	33
4.1.2.	Granulometría.....	36
4.1.3.	Densidad y Absorción	36
4.2.	Contenido de fibras y detección de microplásticos	38
4.2.1.	Contenido de fibras.....	38
4.2.2.	Detección de microplásticos.....	41
4.3.	Caracterización del hormigón.....	42
4.3.1.	Consistencia en estado fresco	42
4.3.2.	Caracterización en estado endurecido	43
4.3.2.1.	Resistencia a la compresión.....	44
4.3.2.2.	Resistencia a la tracción.....	46
4.3.2.3.	Módulo de elasticidad.....	47
4.3.2.4.	Ensayo Barcelona	49
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
5.1.	Caracterización del árido reciclado.....	52
5.2.	Recuperación de fibras y detección de microplásticos	52
5.3.	Propiedades mecánicas del FRC multireciclado.....	53
6.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION	54
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capítulo 17 de la “Lista Europea de Residuos” sobre RCD	4
Tabla 2. Disposiciones relacionadas con los residuos, en general, y con los residuos de construcción y demolición, en particular, en España	8
Tabla 3. Regulaciones españolas específicas de los RCD.....	9
Tabla 4. Legislación relacionada con el medio ambiente en España	9
Tabla 5. Propiedades del árido natural (absorción y densidad).....	21
Tabla 6. Propiedades mecánicas de fibras de polipropileno MasterFiber 249	22
Tabla 7. Propiedades del plastificante MasterPozzolith 7003.....	23
Tabla 8. Métodos de ensayos propiedades físicas del árido reciclado	24
Tabla 9. Métodos de ensayos propiedades mecánicas hormigón	24
Tabla 10. Plan de ensayos propiedades mecánicas en probetas	25
Tabla 11. Mix de áridos	29
Tabla 12. Dosificación hormigón I Generación	30
Tabla 13. Dosificación hormigón II Generación	30
Tabla 14. Dosificación hormigón III Generación.....	30
Tabla 15. Distribución de amasadas y fecha de realización	31
Tabla 16. Tasa de recolección de árido reciclado de hormigón	33
Tabla 17. Tasa de reciclaje del hormigón en árido reciclado por fracción.....	34
Tabla 18. Valores de densidad y absorción del árido reciclado	37
Tabla 19. Resultados cuantificación contenido de fibras libres e incrustadas.....	39
Tabla 20. Resultados ensayo detección de microplásticos	41
Tabla 21. Valores de consistencia obtenidos en las amasadas realizadas por cono de Abrams	42
Tabla 22. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 y 28 días	44
Tabla 23. Resultados del ensayo de resistencia a tracción a 7 y 28 días	46
Tabla 24. Resultados del ensayo de módulo de elasticidad a 7 y 28 días	48
Tabla 25. Resultados ensayo Barcelona	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gestión de RCD. Fuente: Comisión Europea. Ref. Ares (2016)6914779	2
Figura 2. Generación de residuos (kg per cápita) países de la UE en 2018. Fuente: Eurostat (env_wasgen).....	5
Figura 3. Composición típica de los RCD en España. Fuente: PNRCO 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001).....	7
Figura 4. Áridos reciclados de hormigón. Fuente: ing. Diego Velandia, Argos	10
Figura 5. Áridos reciclados cerámicos. Fuente: Gestora de Runes	10
Figura 6. Áridos reciclados mixtos. Fuente: Reciclados Roster.....	10
Figura 7. Áridos reciclados con asfalto. Fuente: Reciclados Roster	11
Figura 8. Resistencia a la compresión de diversas mezclas de hormigón. Fuente Huda et al (2014).....	18
Figura 9. Distribución de tamaño de partícula y absorción de agua. Fuente: Kunieda et al. (2014)	18
Figura 10. Diagrama cíclico de procesos del programa experimental	19
Figura 11. Diagrama de fases del programa experimental	20
Figura 12. Curvas granulométricas del árido natural	21
Figura 13. Fibras de polipropileno MasterFiber 249.....	22
Figura 14. Trituradora de mandíbulas	23
Figura 15. Máquina determinación propiedades mecánicas, a) Prensa Ibertest y b) Pulidora de probetas	25
Figura 16. Ensayos propiedades mecánicas del hormigón.....	26
Figura 17. Técnica determinación cuantía de fibras libres: a) Separación manual, b) Flotación.....	27
Figura 18. a) Proceso de filtrado, b) muestra microplásticos retenida en tamiz de 0,125 mm.....	28
Figura 19. Curvas granulométricas mix de áridos para mezclas de hormigón.....	29
Figura 20. Proceso de fabricación mezclas hormigón.....	32
Figura 21. Desmolde y curado de probetas en cámara húmeda	32
Figura 22. Distribución tamaño de partículas del árido reciclado RCA.....	34

Figura 23. Retención de árido debido a fibra	35
Figura 24. Aspecto del RCA: a) 4/12mm de 0-RCA, b) 12/20mm de 0-RCA, c) 4/12mm de 6-RCA, d) 12/20mm de 6-RCA, e) 4/12mm de 0-0-RCA, f) 12/20mm de 0-0-RCA, g) 4/12mm de 0-6-RCA, h) 12/20mm de 0-6-RCA, i) 4/12mm de 6-0-RCA, j) 12/20mm de 6-0-RCA, k)4/12mm de 6-6-RCA, l) 12/20mm de 6-6-RCA.....	35
Figura 25. Curva granulométrica RCA: a) 1er ciclo de reciclaje, b) 2do ciclo de reciclaje	36
Figura 26. Evolución de la densidad por tipo de árido	37
Figura 27. Evolución de la absorción de agua por tipo de árido	37
Figura 28. Mecanismo de remoción de mortero. Fuente: Kunieda et al., 2014	38
Figura 29. Componentes adicionales en los RCA procedentes de FRC. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 30. Observación de fibras en RCA: a) 6-RCA, b) 0-6-RCA, c) 6-0-RCA, d) 6-6-RCA	40
Figura 31. Etapas del ensayo de detección de microplásticos.....	41
Figura 32. Mezcla 6-RAC-6: a) Aspecto de mezcla, b) Prueba cono de Abrams	43
Figura 33. Factor de Corrección F4. Fuente: Pérez Sánchez, M. (1998)	44
Figura 34. Gráfico resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 y 28 días	45
Figura 35. Gráfico resultados del ensayo de resistencia a tracción “Brasileño” a 28 días	46
Figura 36. Aspecto de probeta 6-NAC sometida a ensayo de tracción indirecta separada manualmente.....	47
Figura 37. Gráfico resultados del ensayo de módulo de elasticidad a 7 y 28 días	48
Figura 38. Resistencia residual después de la rotura mediante ensayo Barcelona. Comparativa Generación I, II y III	50
Figura 39. Resistencia residual después de la rotura: a) hormigones sin fibra en su última generación, b) hormigones con fibra en su última generación	50

1. INTRODUCCION

El sector de la construcción, con un 10% del PIB, ocupa un lugar importante en la economía europea, por lo que se considera como el mayor consumidor de recursos naturales no renovables, demandando cada año cerca de 2700 millones de toneladas de áridos (UEPG, 2017), además de generar importantes impactos sobre el medio ambiente, entre ellos la producción de grandes cantidades de residuos, siendo por ello un sector prioritario en la política ambiental de la UE. En consecuencia, se hace necesario reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente derivados de la actividad de la construcción mediante la aplicación de medidas que garanticen la gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición de acuerdo con los conceptos de desarrollo sostenible y economía circular, base de los modelos productivos actuales (Comisión Europea, 2016; Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018).

El consumo de áridos naturales está aumentando significativamente con el aumento de la producción y utilización de hormigón en el sector de la construcción. La industria de la construcción es uno de los mayores consumidores de áridos naturales. El uso de los áridos en otras industrias no deja de ser importante, aunque se destina solo el 12% de la producción nacional. Según estadísticas de ANEFA, en España se producen 500 millones de toneladas de áridos al año, por lo que al menos 60 millones se usan fuera del sector construcción (ANEFA, 2020). Para satisfacer esta enorme demanda, las fuentes de áridos naturales de buena calidad están disminuyendo considerablemente.

Las materias primas utilizadas en la construcción pueden causar efectos negativos en el medio ambiente durante todas las fases de su ciclo de vida. Si se tiene en cuenta la fase de adquisición de las mismas, los efectos más comunes son aquellos vinculados a la minería, así como a las prácticas de explotación que pueden afectar a los hábitats y a la eliminación de la vegetación que aumenta la escorrentía, la pérdida de la capa superior del suelo y la sedimentación de los cursos de agua. Las emisiones y residuos generados durante la fase de producción repercuten directamente sobre la calidad del aire, del agua y del suelo. Así mismo, el transporte de los materiales hasta el lugar de producción, utiliza combustibles no renovables y genera emisiones contaminantes al aire (Suárez Silgado, 2015).

Con respecto al volumen de residuos que se generan en este sector, el problema ambiental deriva no solo de la abundancia de los mismos, sino de su inadecuado tratamiento, en la mayor parte de los casos. A la insuficiente prevención de la producción de residuos en origen se une el impacto ecológico negativo derivado del derroche de materias primas cuando no se contempla el reciclaje (Sánchez Roldán, 2019).

En cuanto a las consideraciones medioambientales asociadas al uso de materiales procedentes del tratamiento de los residuos de la construcción y demolición, se destaca el riesgo de contaminación de suelos, corrientes de agua superficial y acuíferos por lixiviación. Esto se debe a que los áridos reciclados pueden contener elementos tóxicos, tales como metales pesados, sulfatos, cloruros y compuestos orgánicos, que al entrar en contacto con el agua pueden disolverse en mayor o menor extensión y ser arrastrados a través de aguas de filtración (González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005).

Se puede concluir que los impactos negativos asociados directa o indirectamente al sector de la construcción se pueden aliviar gestionando de forma eficiente los residuos generados y utilizándolos como materiales secundarios que puedan ser reincorporados a la actividad constructiva. En este sentido, una investigación adecuada sobre hormigón multireciclado es muy necesaria, ya que el problema se puede resolver hoy con el reciclaje del hormigón, pero puede reaparecer en 50 años, otra vez, al final del período de servicio. Por tanto, se hace necesario conocer los límites del material y el comportamiento de sus propiedades mecánicas.

Más importante aún, el árido grueso reciclado repetido reducirá la carga en el relleno sanitario y disminuirá el uso de árido natural, compensando así la extracción, el procesamiento, el transporte y las cargas ambientales relacionadas (Huda and Alam, 2014).



Figura 1. Gestión de RCD. Fuente: Comisión Europea. Ref. Ares (2016)6914779

En las últimas décadas el empleo de hormigón reforzado con fibras (fibre reinforced concrete, FRC) se está generalizando en el mundo de la construcción a escala internacional. Ya es habitual ejecutar con este material obras de soleras y pavimentaciones industriales, hormigones proyectados para túneles, taludes y ejecución de piscinas, hormigones prefabricados, etc. También está incrementando el uso de FRC en elementos estructurales en edificación como forjados (Aidarov, Mena and de la Fuente, 2021).

Este tipo de hormigón puede mejorar no solo las propiedades mecánicas sino también la durabilidad debido a la reducción del ancho de la fisura por efecto de puente de fibras. Sin embargo, la fase desconocida es la etapa final después del período de servicio. No existe suficiente conocimiento sobre el proceso de triturado de FRC. Por lo cual surge la duda de si FRC triturado se puede utilizar como árido reciclado o no. Aunque las investigaciones anteriores solo se han centrado en las ventajas de la aplicación de FRC, no existe una estrategia sobre el tratamiento de FRC después del período de servicio (Kunieda et al, 2014). Si bien, el reciclaje de FRC puede ser un desafío, porque las barras de acero se separan fácilmente del hormigón con imanes utilizando la tecnología de hoy, pero las fibras al ser cortas y haber muchas distribuidas en la matriz, es difícil reciclar FRC, más aún si las fibras no son metálicas.

En este sentido, desde el punto de vista de la sostenibilidad, el tratamiento de FRC después del período de servicio de las estructuras de hormigón debería ser uno de los temas importantes en un futuro próximo.

Este documento estudia la factibilidad del multireciclaje de hormigones fabricados con fibra poliméricas e investiga las propiedades frescas y endurecidas de este tipo de concreto. En este estudio se cubren diferentes tipos de propiedades de los áridos y el comportamiento mecánico del hormigón reciclado elaborado con dos generaciones diferentes de áridos gruesos reciclados.

1.1. Objetivos

En base a lo expuesto en el apartado anterior, el objetivo principal de esta tesis es estudiar la viabilidad estructural del multireciclaje de hormigones reforzados con fibras poliméricas, para lo cual se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una campaña experimental de 3 generaciones de hormigón diseñado con incorporación de áridos reciclados gruesos de 2 ciclos sucesivos de reciclaje, comparándolo con el de un hormigón de referencia donde todos los áridos son naturales.
- Evaluar el comportamiento de las propiedades físicas de los áridos a medida que aumenta el número de ciclos de reciclaje.
- Estudiar experimentalmente el efecto del reciclado múlti-generacional en el rendimiento mecánico del hormigón.
- Comparar el efecto del empleo de fibras poliméricas en las propiedades mecánicas del hormigón multireciclado.
- Analizar la capacidad de recuperación y reciclaje de fibras poliméricas procedente de árido de reciclado múltiple.
- Validar el uso estructural de los hormigones reforzados con fibras poliméricas fabricados con una sustitución del 100 % de la fracción gruesa por árido reciclado de 3 generaciones.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Residuos de construcción y demolición (RCD)

La Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018), define residuos de construcción y demolición (RCD) como aquellos residuos generados por las actividades de construcción y demolición. En el marco legal español, este término se define por primera vez en el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición ((Ministerio de la Presidencia, 2008), como "cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de «Residuo» incluida en el artículo 3.a de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado, 2011) se genere en una obra de construcción o demolición".

Dentro del concepto de residuo de construcción y demolición se incluye un conjunto de residuos que se engloban, en su mayor parte, en el capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos, LER (Ministerio de Medio Ambiente, 2002; Comisión Europea, 2014a), con exclusión de los residuos peligrosos y del material en estado natural clasificado en la categoría 17 05 04 (tierras y piedras distintas de las especificadas en el código 17 05 03). En la Tabla 1 se incluye una descripción del flujo de estos residuos. En cambio, el protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE (Comisión Europea, 2016), considera que estos residuos son los generados en las actividades de las empresas pertenecientes al sector de la construcción e incluidos en la categoría 17 de la citada lista de residuos; es decir, a todos los procedentes de trabajos de construcción, reforma y demolición (peligrosos y no peligrosos, inertes, orgánicos e inorgánicos), aunque excluye de su ámbito de aplicación a la tierra excavada (17 05) (Sánchez Roldán, 2019).

Tabla 1. Capítulo 17 de la “Lista Europea de Residuos” sobre RCD

17	RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (INCLUIDA LA TIERRA EXCAVADA DE ZONAS CONTAMINADAS)
17 01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
17 01 01	Hormigón
17 01 02	Ladrillos
17 01 03	Tejas y materiales cerámicos
17 01 06*	Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos que contienen sustancias peligrosas
17 01 07	Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, distintas de las especificadas en el código 17 01 06
17 02	Madera, vidrio y plástico
17 02 01	Madera
17 02 02	Vidrio
17 02 03	Plástico
17 02 04*	Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas
17 03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
17 03 01*	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla
17 03 02	Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01
17 03 03*	Alquitrán de hulla y productos alquitranados
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones)
17 04 01	Cobre, bronce, latón
17 04 02	Aluminio
17 04 03	Plomo
17 04 04	Zinc
17 04 05	Hierro y acero
17 04 06	Estaño
17 04 07	Metales mezclados
17 04 09*	Residuos metálicos contaminados con sustancias peligrosas
17 04 10*	Cables que contienen hidrocarburos, alquitrán de hulla y otras sustancias peligrosas
17 04 11	Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10
17 05	Tierra (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
17 05 03*	Tierra y piedras que contienen sustancias peligrosas
17 05 04	Tierra y piedras distintas de las especificadas en el código 17 05 03
17 05 05*	Lodos de drenaje que contienen sustancias peligrosas
17 05 06	Lodos de drenaje distintos de los especificados en el código 17 05 05
17 05 07*	Balasto de vías férreas que contiene sustancias peligrosas
17 05 08	Balasto de vías férreas distinto del especificado en el código 17 05 07
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
17 06 01*	Materiales de aislamiento que contienen amianto
17 06 03*	Otros materiales de aislamiento que consisten en sustancias peligrosas o contienen dichas sustancias
17 06 04	Materiales de aislamiento distintos de los especificados en los códigos 17 06 01 y 17 06 03
17 06 05*	Materiales de construcción que contienen amianto
17 08	Materiales de construcción a base de yeso
17 08 01*	Materiales de construcción a base de yeso contaminados con sustancias peligrosas
17 08 02	Materiales de construcción a base de yeso distintos de los especificados en el código 17 08 01
17 09	Otros residuos de construcción y demolición
17 09 01*	Residuos de construcción y demolición que contienen mercurio
17 09 02*	Residuos de construcción y demolición que contienen PCB (por ejemplo, sellantes que contienen PCB, revestimientos de suelo a base de resinas que contienen PCB, acristalamientos dobles que contienen PCB, condensadores que contienen PCB)
17 09 03*	Otros residuos de construcción y demolición (incluidos los residuos mezclados) que contienen sustancias peligrosas
17 09 04	Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03

*Residuos peligrosos

2.1.1. Generación y composición de los RCD

El sector de la construcción genera una gran cantidad de residuos. Desde que en los años 90 se publicara el primer informe que estableció una visión general sobre los residuos de construcción y demolición (Symonds *et al.*, 1999) hasta la actualidad, las estadísticas publicadas ofrecen una información heterogénea sobre la generación de los mismos en los países miembros de la UE.

Los principales resultados estadísticos estimados por Eurostat conforme al Reglamento (UE) 849/2010 de la Comisión de 27 de septiembre (Comisión Europea, 2010), indicaron que en 2018 la cantidad total de residuos generados en la EU-27, por la totalidad de actividades económicas y los hogares ascendió a 2277 millones de toneladas. De esta cantidad el 35,7% correspondió con los generados en actividades del sector de la construcción, que supuso un total de 813 millones de toneladas de residuos. La participación del resto de actividades económicas fue del 26,3% para la minería y canteras, del 10,7% para la industria manufacturera, del 10,2% para los servicios de agua y residuos y del 8,2% en los hogares; el 9,4% restante corresponde a residuos generados por otras actividades económicas, principalmente servicios (4,4%) y energía (3,5%). (Eurostat, 2020).

La Figura 2 muestra un análisis de la cantidad de residuos generados de forma estandarizada, en relación con el tamaño de la población. Los altos niveles de residuos totales generados en algunos de los Estados miembros más pequeños de la UE pueden verse claramente. Varios de los Estados miembros con niveles especialmente elevados de residuos generados per cápita informaron de una proporción muy elevada de residuos de la minería y la explotación de canteras, mientras que en otros lugares la construcción y la demolición contribuyeron a menudo a la elevada proporción. Gran parte de los desechos de la minería y la explotación de canteras y de la construcción y demolición se clasifican como desechos minerales importantes: el análisis que se presenta en la Figura 3.5.1 distingue los desechos minerales importantes de todos los demás desechos. Casi dos tercios (66% o 3,4 toneladas per cápita) del total de residuos generados en la UE en 2018 fueron residuos minerales importantes. En España, en el año 2018 se generaron en torno a 129 millones de toneladas de residuos, de los cuales 35,8 millones de toneladas corresponden a los residuos de construcción y demolición. (Eurostat, 2020).

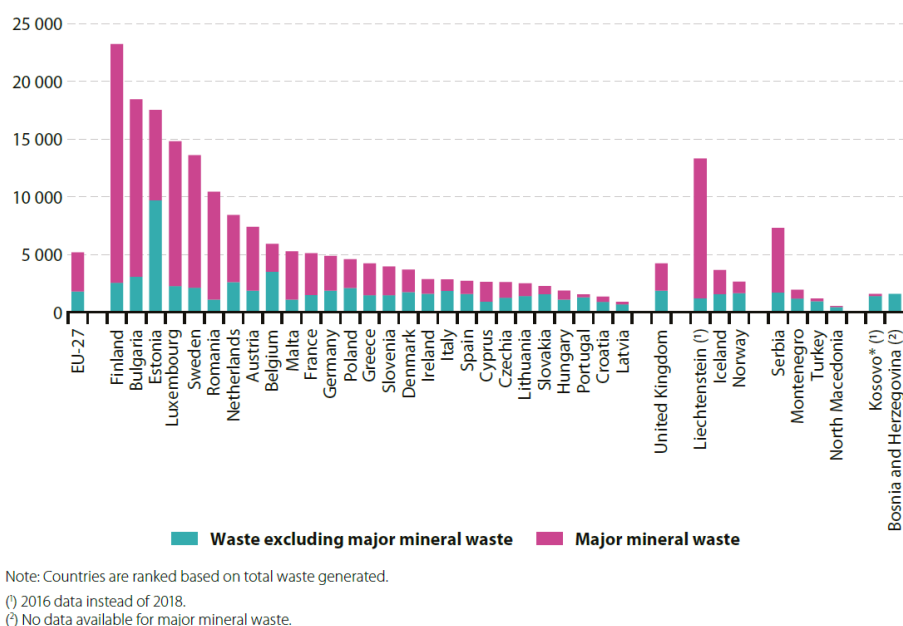


Figura 2. Generación de residuos (kg per cápita) países de la UE en 2018. Fuente: Eurostat (env_wasgen)

Con carácter general, los residuos que se generan en actividades de construcción y demolición están compuestos principalmente por hormigón, cerámicos, pétreos, asfalto y tierras de excavación; además pueden contener otros materiales como yeso, maderas, plásticos, aceros, papel y cartón, considerados como impurezas (Ministerio de Fomento, 2008). La mayor parte de ellos se pueden calificar como inertes y no suelen suponer características de peligrosidad en su forma original, pero durante la etapa de demolición pueden volverse peligrosos debido a su mezclado, procesamiento o eliminación.

Algunos de los materiales y sustancias que pueden encontrarse en los residuos de construcción y demolición tienen alguna característica de peligrosidad al ser utilizadas junto con el hormigón en la estructura y en los acabados, pudiendo en este caso dar lugar a que los residuos sean caracterizados como peligrosos, de acuerdo con los criterios establecidos en el Reglamento (UE) 1357/2014 de la Comisión por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE y en la Decisión de la Comisión que modifica la lista de residuos (Comisión Europea, 2014a, 2014b). Entre estos materiales y sustancias destacan (IHOBE, 2009): amianto (localizado en aislamientos, techos y baldosas y sellado resistente al fuego), pinturas a base de plomo (en techos, tejas y cables eléctricos), fenoles (en revestimientos a base de resina, adhesivos y otros materiales), policlorobifenilos (en el sellado de juntas y pinturas/abrigos ignífugos, así como en artículos eléctricos) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) frecuentemente presentes en filtros para techos y pisos (Sánchez Roldán, 2019).

En Europa, en general, el mayor porcentaje de residuos producidos corresponde a los categorizados como no peligrosos, principalmente materiales minerales y a la tierra, frente al 2% clasificados como peligrosos (Eurostat, 2018). Las diferencias en la composición de estos residuos entre unos países y otros puede ser reflejo de la tipología, tradición y técnicas de construcción local (Fischer and Werge, 2009; Villoria Sáez, 2014), condiciones climáticas, actividades económicas y desarrollo tecnológico de un área (Silvia et al., 2014), además de a las características económicas del país (Eurostat, 2020).

En España, los residuos generados en las actividades de la construcción y demolición en el año 2016 estaban compuestos de un 64% de material natural excavado, un 34% de residuos minerales (hormigón, cerámicos o áridos tratados) y un porcentaje minoritario de otros materiales (2%), siendo la cantidad correspondiente a residuos clasificados como peligrosos insignificante (0,22% en peso del total). En la Figura 3 se muestran los datos que se publicaron en el primer Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición, PNRC D 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001), y que posteriormente no fueron actualizados en el II Plan Nacional Integrado de Residuos, PNRC D 2007-2015 (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009), ni en el PEMAR 2016-2022 (Ministerio de Agricultura, 2015). Estos datos se basaron en estudios estadísticos realizados en obras reales, y mostraron que la mayor parte de ellos son residuos inertes (75%), estando integrada la principal fracción por ladrillos, tejas y otros tipos de cerámica (54% del total generado), seguida del hormigón que constituye un 12%, los áridos no tratados y la piedra natural representan un 9%, mientras que el resto son cantidades variables de residuos de madera, metal, yesos, plásticos, entre otros (Sánchez Roldán, 2019).

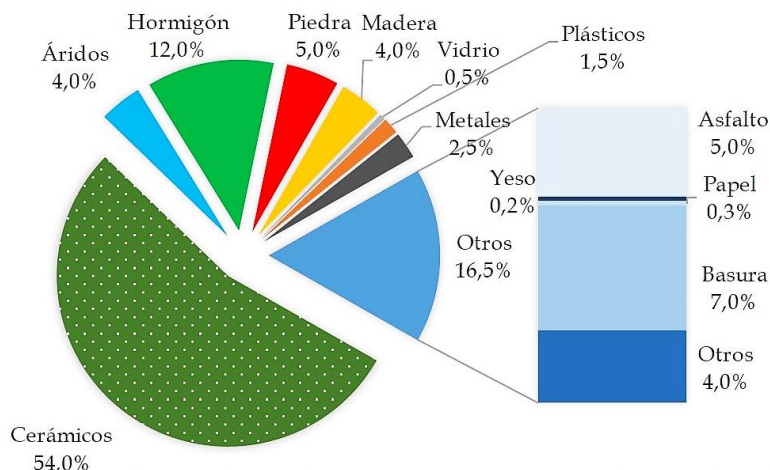


Figura 3. Composición típica de los RCD en España. Fuente: PNRC D 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001)

2.1.2. Gestión y marco regulador de los RCD

De acuerdo a los datos publicados por Eurostat conforme al Reglamento (UE) 849/2010 de la Comisión de 27 de septiembre (Comisión Europea, 2010), en la UE-28 en el año 2016 se trataron alrededor de 295 millones de toneladas correspondientes a la fracción mineral de los residuos no peligrosos de construcción y demolición (hormigón, ladrillos, azulejos, cerámica y piedra). La mayor parte de estos residuos se destinó a operaciones de reciclaje (83,8%), frente a un 5,8% utilizado en operaciones de relleno de zonas excavadas, un 10% se llevaron a vertedero y un insignificante porcentaje se destinó a la incineración (0,4%), ya sea con recuperación de energía o sin ella. En España, en 2016 se trató un volumen de residuos minerales procedentes de los residuos de construcción y demolición de 9,08 millones de toneladas (excluidos los residuos peligrosos y la tierra de excavación). De ellos un 70,6% se destinó a reciclaje, un 8,4% a operaciones de relleno, mientras que el depósito de residuos en vertedero alcanzó el 21% restante; en total el porcentaje de valorización de estos residuos fue del 79%, alcanzando con ello el objetivo marcado para 2020 (Eurostat, 2017). Sin embargo, el mercado de áridos reciclados, se encuentra entre los menos desarrollados. Según las estimaciones de ANEFA, en 2019 el consumo total de áridos para la construcción alcanzó los 140,0 millones de toneladas, de las cuales 2,5 millones de toneladas son áridos reciclados, lo que corresponde tan sólo al 1,8% del total (ANEFA, 2020). A pesar de ello, su uso siempre va a depender del contexto local, de las características del mercado, así como de la oferta y la demanda existente.

La normativa española ha ido resolviendo la transposición de las directrices y decisiones europeas en materia de residuos, e incluso se han promulgado regulaciones específicas, plasmadas en el desarrollo de los diferentes planes de prevención y gestión de los mismos. Actualmente, el marco regulador en materia de residuos, en general, de residuos de construcción y demolición, en particular, y de medio ambiente queda establecido a través de las disposiciones recogidas entre la Tabla 2, Tabla 3 y la Tabla 4, respectivamente.

Tabla 2. Disposiciones relacionadas con los residuos, en general, y con los residuos de construcción y demolición, en particular, en España

Residuos	<p>Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, por la que se deroga la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos y se transpone a la legislación española la Directiva 2008/98/CE, de 19 de noviembre, sobre residuos.</p> <p>Orden AAA/699/2016, de 9 de mayo, por la que se modifica la operación R1 del anexo II de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, y se transpone al marco español la Directiva (UE) 2015/1127, de 10 de julio, por la que se modifica el anexo II de la Directiva 2008/98/CE que establece una lista no exhaustiva de operaciones de valorización.</p>
Vertido de residuos	<p>Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, resultante de la transposición de la Directiva 1999/31/CE del Consejo, del 26 de abril, relativa al vertido de residuos.</p> <p>Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero.</p>
Lista de residuos	<p>Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Corrección de errores en BOE núm. 61, de 12 de marzo de 2002.</p>
Prevención de residuos	<p>Resolución de 20 de diciembre de 2013, de la Dirección general de calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 13 de diciembre de 2013, por el que se aprueba el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020.</p>
Gestión de residuos	<p>Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, que aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR 2016-2022).</p>

En 2008 el ordenamiento jurídico español establece por primera vez un documento normativo referido, exclusivamente, a los residuos de construcción y demolición (Real Decreto 105/2008) y lo hace desde el punto de vista del principio de prevención, dentro de la jerarquía de gestión de residuos derivada de las directrices europeas. Este real decreto tiene por objeto establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, con el fin de fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, asegurando que los destinados a operaciones de eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción. Establece los criterios mínimos para distinguir cuándo la utilización de residuos inertes en obras de restauración, acondicionamiento o relleno, puede considerarse una operación de valorización y no de eliminación en vertedero; además de las obligaciones del poseedor, productor y gestor de los residuos de construcción y demolición (Sánchez Roldán, 2019).

Tabla 3. Regulaciones españolas específicas de los RCD

Residuos de construcción y demolición	<p>Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición</p> <p>Orden APM/1007/2017, de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para su utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquéllas en las que se generaron.</p>
--	---

Tabla 4. Legislación relacionada con el medio ambiente en España

Medio ambiente	<p>Ley 34/2007, de 15 de noviembre de 2007, de calidad del aire y protección de la atmósfera</p> <p>Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.</p> <p>Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo y, a su vez, se deroga la Ley 16/2002, de 1 de julio.</p>
-----------------------	---

Por su lado, la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados establece objetivos específicos para la preparación para la reutilización, reciclado y valorización de los residuos de construcción y demolición. Esta Ley orienta la política de residuos conforme al principio de jerarquía en la producción y gestión de los mismos, maximizando el aprovechamiento de los recursos y minimizando los impactos derivados. Entre los artículos a destacar en esta Ley está el correspondiente al “fin de la condición de residuo” y el dedicado a “Jerarquía de residuos”, el cual clarifica el orden de prioridad en las actuaciones en la política de residuos (prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otros tipos de valorización y eliminación de los residuos).

2.2. Árido reciclado

2.2.1. Definición y tipología

De acuerdo con la definición dada por el Comité Técnico nacional de normalización AEN/CTN 146 de "Áridos" (o CEN/TC 154, comité europeo de normalización), el árido reciclado es el *material granular resultante del procesamiento de material inorgánico utilizado previamente en la construcción*. Dicho material inorgánico hace referencia a la parte pétreo de los residuos generados en obras de demolición, construcción o rehabilitación.

Teniendo en cuenta la gran heterogeneidad de este material granular, existen diversos criterios de clasificación de los áridos reciclados: composición, granulometría, grado de limpieza del material, calidad (en función de sus propiedades técnicas) y, finalmente, atendiendo a su uso. La "*Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición*" (GERD, 2012) establece una clasificación de dichos áridos con relación a la composición del material (AENOR, 2009a), para la cual propone las siguientes categorías:

- **Áridos reciclados de hormigón**, aquellos que se obtienen a partir de residuos de hormigón tras un proceso de machaqueo, cribado y procesado. El contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) es del 90% o más en peso.



Figura 4. Áridos reciclados de hormigón. Fuente: ing. Diego Velandia, Argos

- **Áridos reciclados cerámicos**, los que provienen del procesamiento de residuos mayoritariamente cerámicos (ladrillos, tejas o baldosas cerámicas). El contenido de material cerámico supera el 70%.



Figura 5. Áridos reciclados cerámicos. Fuente: Gestora de Runes

- **Áridos reciclados mixtos**, son áridos obtenidos a partir del tratamiento de residuos de construcción y demolición con mezcla de diferentes materiales cerámicos, de hormigón, áridos no ligados, etc. Esta categoría incluye, a su vez, dos subcategorías:
 - mixtos de hormigón, si el contenido de hormigón y piedra es menor al 90% y el de material cerámico no alcanza el 30%;
 - mixtos cerámicos, cuando el contenido de este material supera el 30%.



Figura 6. Áridos reciclados mixtos. Fuente: Recicladros Roster

- **Áridos reciclados con asfalto**, aquellos que proceden de residuos de demolición con composición mayoritariamente asfáltica o que provienen del fresado de capas de firmes. El contenido de materiales bituminosos oscila entre un 5% y un 30%; más del 30% se considera como mezcla bituminosa.



Figura 7. Áridos reciclados con asfalto. Fuente: Reciclados Roster

El objeto de esta clasificación (GERD, 2012) ha sido conseguir un sistema general adecuado al mercado español, que pueda servir de referencia y proporcionar seguridad al mismo. Cuando un determinado material se ajuste a una de las categorías anteriores podrá indicar los niveles de calidad y el potencial de uso más adecuado para el mismo. Sin embargo, la composición es un criterio insuficiente para determinar por sí misma la calidad del árido reciclado, será el cumplimiento de los requisitos técnicos exigidos para un uso determinado el que establecerá finalmente la viabilidad del material a ese uso.

2.2.2. Propiedades de los áridos reciclados

Es fundamental conocer las propiedades físico-mecánicas de los áridos reciclados para su utilización como hormigón. Las principales propiedades a tener en cuenta son: Densidad y Absorción de agua, de manera que en los áridos reciclados estas propiedades están directamente relacionadas con la cantidad de mortero adherido que presentan dichos áridos. A continuación, se exponen las principales características de estas propiedades para los áridos reciclados (AR):

Mortero Adherido. - Según diversos estudios (ACHE, 2006), para las fracciones más gruesas de áridos (10-20 mm), las proporciones de mortero adherido habituales oscilan entre el 23-52%, mientras que en la fracción más fina dentro de la gruesa (4-10 mm), el rango puede ascender hasta 32-61%. Etxeberria et al (2007) obtuvieron una proporción de mortero adherido del 20% en la fracción 10-25 mm, mientras que para la fracción 4-10 mm ascendió hasta el 40%, acorde con los datos de la revisión de ACHE (ACHE, 2006), pero más próximo a los límites inferiores. Además, según recoge la monografía ACHE, la resistencia del hormigón original (Ho) apenas influye en la cantidad de mortero adherido al árido grueso, dependiendo únicamente del proceso de triturado por el cual se obtiene el AR. Por tanto, se puede concluir que la fracción más fina ($D_n=4-10$ mm) presenta mayores porcentajes de mortero que la más gruesa ($D_n > 10$ mm), y por tanto podría pensarse que repercute en mayor medida sobre la disminución de las propiedades del hormigón resultante, de manera que una limitación mayor sobre el tamaño ($D_n > 10$ mm) podría permitir un incremento de la tasa de sustitución del mismo.

Densidad. - Se considera que el HC tiene una densidad media de 2300 kg/m³, por lo que, lógicamente, la fabricación de AR mediante la trituración de este material producirá áridos con una densidad comprendida alrededor de este valor. De este modo, (Sánchez de Juan, 2005) la densidad del AR suele oscilar entre 2100-2400 kg/m³, de manera que pueden considerarse como áridos de densidad normal (no ligeros), por presentar una densidad superior a 2000 kg/m³, siendo perfectamente aplicables a la fabricación de hormigón, según se especifica en la norma UNE-EN

12620:2003+A1:2009 (AENOR, 2009b) aplicando las características de dosificación convencionales.

Absorción de agua. - Se trata de un factor linealmente relacionado con la densidad del AR, de manera que las fracciones menores que presentan una menor densidad (y por tanto mayor porosidad) se caracterizan por una mayor absorción que las fracciones más gruesas. Como datos orientativos, la absorción varía entre el 5-9% para partículas con tamaño máximo de árido de 10 mm, y entre el 4-8% para granulometrías con tamaño máximo de árido de 20 mm. Esta diferencia se debe a la mayor proporción de mortero que presentan las partículas conforme más finas es la fracción (Laserna Arcas, 2015).

2.3. Hormigón con árido reciclado

2.3.1. Ámbito normativo para hormigones reciclados

La aplicación de áridos reciclados (AR) procedentes de los RCD's está reglada en cada país por las normativas propias que regulan la aplicación del hormigón estructural, en las cuales se especifican con claridad las condiciones exigidas a dichos áridos en el caso de utilizarlos como hormigón reciclado (HR).

Así, en los países donde el uso de este tipo de hormigones se encuentra más extendido, dichas especificaciones se encuentran descritas con mayor profundidad y, en general, resultan más permisivas en cuanto a la tasa de utilización de la fracción reciclada. Como normativas referencia a nivel internacional se pueden citar las que derivan de la *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM), y las propias normativas japonesa, alemana, belga, británica o la americana (ACI). Además, el uso estructural de AR se incluirá en el nuevo *fib* (International Federation for Structural Concrete) Model Code 2020 y en la revisión del Eurocódigo 2 (CEN prEN 1992-1-1).

En España, la actual normativa que regula el hormigón estructural, la *EHE-08*, normativa de obligado cumplimiento para el proyecto y ejecución de estructuras de hormigón tanto de edificación como de estructura civil, contempla el uso del HR dentro de su *ANEJO 15: Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados*. En este Anejo se recomienda limitar la utilización de AR al 20% de árido grueso (con un diámetro nominal (D_n) superior a 4 mm) en peso sobre el contenido total de árido grueso, para que las características del hormigón resultante no difieran de las del hormigón convencional (HC). Deja la puerta abierta a tasas de sustitución mayores siempre que se realicen estudios de aptitud de los mismos. La naturaleza del AR se limita únicamente al procedente de hormigón, excluyendo otras naturalezas distintas, e incorporando límites de impurezas sobre la presencia de otros materiales.

Así, dentro del desarrollo de este anejo normativo se realizan observaciones o restricciones sobre la fabricación, características físico-resistente y control de calidad del HR, referenciando todas las características a una tasa de reciclado (r) del 20%, y especificando orientaciones sobre lo que podría suceder con la aplicación de tasas más elevadas, pero sin entrar en detalle en cada una de ellas, refiriendo a ensayos específicos cuando se desea utilizar una tasa mayor del 20%.

Otras normativas internacionales (normativa japonesa o belga) resultan menos restrictivas a este aspecto, llegando a permitir unos porcentajes de sustitución de hasta un 50%, en función de la calidad del árido reciclado. Por otro lado, son numerosos los estudios que presentan resultados satisfactorios con porcentajes de sustitución del 100% del árido natural, encontrando que las características del HR resultante se encuentran dentro de los requerimientos resistentes que especifican las normativas.

2.3.2. Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

2.3.2.1. Resistencia a compresión (f_c)

La resistencia a compresión (f_c) es la característica resistente más representativa de un hormigón; por ello, casi la totalidad de los estudios realizados en HR determinan este parámetro, que en muchas ocasiones es utilizado para estimar el resto de los parámetros resistentes (resistencia a tracción, módulo de elasticidad, energía de fractura, resistencia a flexión, etc...).

De forma general, las diferentes experiencias realizadas respecto al comportamiento a compresión de HR coinciden en que, siempre que se mantenga la relación $(a/c)_{ef}$, es decir, considerando el agua disponible para la hidratación (compensando la absorción de AR mediante pre-saturación, añadiendo agua...), se produce una disminución de la f_c a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de reciclado (r). La bajada de resistencia varía en función de la fuente consultada, de manera que para un $r=100\%$ la resistencia disminuye, como media, entre un 15-20%, llegando a un 10% en los mejores casos y un 30% en los peores. Cuando la mezcla de diseño pretende alcanzar un nivel de tensiones con resistencias a compresión medias (f_{cm}) superior a 30 MPa, la pérdida de resistencia será más acentuada (Gómez et al., 2001).

Según describe (ACHE, 2006), para niveles de $r=50\%$, la caída de resistencia se sitúa entre el 5-15%, abundando también resultados en los que no se observa dicha disminución sobre la f_{cm} . Para tasas de reciclaje $r=20-30\%$, la pérdida de resistencia es inferior al 5%. González-Fontebao y Martínez-Abella (2005) hacen un acercamiento a la fabricación de HR a un uso convencional, y para aplicación a escala industrial, en el que utilizan los límites marcados por la EHE-08 para ambientes IIa y IIb (comunes en edificación) mediante la dosificación ajustada basada en 300 kg/m³ de cemento y $a/c=0,55$. En ella concluyen que, la fabricación de HR con los áridos utilizados satisface los requerimientos de la misma en una tasa de sustitución del 50%.

Sobre la influencia de la relación a/c , las diferentes experiencias muestran que para conseguir un HR con una resistencia a compresión similar, o incluso superior, que para el HC se deben utilizar relaciones a/c inferiores a las de éste. En este sentido, Domingo *et al* (2009), enmarcados en el proyecto RECNHOR (2006-2008), realizan estudios sobre HR utilizando sustituciones de hasta el 100% manteniendo la relación a_{total}/c y corrigiendo la consistencia mediante el incremento de aditivo, sin encontrar diferencias significativas en la resistencia a compresión.

En cuanto a la evolución de la f_{cm} con el tiempo, los principales resultados indican que el aumento de la resistencia del HR a partir de los 28 días es mayor que para el HC. En este aspecto, destacan los ensayos llevados a cabo por Kou *et al* (2011) y Kou y Poon (2013), donde analizan la evolución de f_{cm} en hormigones hasta una edad de 5 años de curado. En esta experimentación, los investigadores obtienen una bajada de aproximadamente 20% en la f_{cm28} del HR respecto al HC. Sin embargo, la evolución obtenida a partir de los 28 días es mayor en el HR, de manera que la ganancia obtenida a los 5 años para HR con $r=100\%$ es de 52-62%, mientras que para el HC es de un 34%, por lo que la bajada de resistencia global observada a esta edad es de un 6-8%.

2.3.2.2. Resistencia a tracción (f_{ct})

La resistencia a tracción (f_{ct}) es una de las propiedades que se ve menos afectada tras la sustitución de AN por AR. Sin embargo, de igual manera que sucede con f_{cm} , existe una gran dispersión en los resultados según la fuente consultada. Según concluye (ACHE, 2006) en referencia a diferentes estudios, cuando la sustitución supone el 100% del árido grueso, las pérdidas de la resistencia media a tracción (f_{tm}) varían en torno al 6-20%, mientras que para sustituciones menores al 50%, las diferencias apenas son apreciables.

Por otro lado, cuando se emplea AR con una humedad alta pero no saturado (80%), los resultados obtenidos para la resistencia a tracción indirecta (splitting tensile strength, $f_{ct,sp}$) en hormigones con una $r = 100\%$ son alrededor de un 10% más altos que las obtenidas en el HC (Etxeberria *et al.*, 2007). Según Salem y Burdette (1998) este comportamiento se debe principalmente a la capacidad de absorción del mortero adherido presente en el AR y la eficacia de la nueva zona ITZ del mortero con los áridos reciclados. Según Sague-Crentsil *et al* (2001), la ausencia de efectos perjudiciales sobre la resistencia a tracción del hormigón es indicativo de una buena adherencia entre el árido y el mortero de la matriz.

Respecto a la evolución de $f_{ct,sp}$, se encontró un comportamiento similar al que ocurre en compresión con el paso del tiempo (Kou, Poon and Etxeberria, 2011). Así, la ganancia que sufre el HR es mayor que la que sufre el HC, de manera que las ganancias observadas tras 5 años de curado para un HR con $r=100\%$ es del 56-65%, mientras que para el HC es de un 37%. Puesto que, en esta propiedad del material, la diferencia absoluta que sufre el hormigón es menor que para la resistencia a compresión, los resultados a 5 años muestran que el HR obtiene mayor resistencia a tracción indirecta (6-10%) que el HC.

A pesar de estos datos, Etxeberria *et al.*(2007), en sus ensayos a escala industrial, no han observado estos aumentos de $f_{ct,sp}$ en HR con $r = 100\%$, de manera que a los 6 meses de edad el hormigón no consiguió ganancia alguna respecto a la obtenida a los 28 días de edad (+1%), siendo del 19% para el HC y para el HR con una tasa de reciclado $r = 25\%$, y de un 13% para el HR con $r=50\%$.

2.3.2.3. Módulo de elasticidad (E_c)

En relación al Módulo de Elasticidad del hormigón (E_c), las diversas experimentaciones muestran que este parámetro también decrece claramente en función de la tasa de sustitución de AR. Según (ACHE, 2006), los resultados indican que esta disminución es mayor que la sufrida por la resistencia a compresión. Como resumen se establece que la caída de E_c varía entre un 20-30% para HR con $r = 100\%$, 10-15% para HR con $r = 50\%$, y menos del 5% cuando $r = 20\%$.

En otras investigaciones se observó que las pérdidas de E_c para el HR disminuyen en torno al 60-100% sobre el HC, atribuyendo estas diferencias a la gran cantidad de “mortero viejo” (con un módulo de elasticidad comparativamente más bajo) adherido a los áridos originales. De este modo el módulo de elasticidad del HR siempre es menor al del hormigón de referencia cuando el resto de variables permanecen constantes (Gómez, Vázquez and Agulló, 2001a, 2001b). Wang *et al* (2013) fabrican HC y HR con $r = 100\%$ del árido reciclado grueso (ARG) para diferentes resistencias a compresión, y obtienen que para amasadas similares, la f_c disminuye alrededor del 10-14% y su correspondiente E_c lo hace en un 13,7%.

Como se demuestra de todas estas experimentaciones, el módulo de elasticidad depende de múltiples factores: elasticidad del mortero cementante, características de forma y rugosidad de los áridos, características de la Zona de Transición (ITZ), edad del hormigón, etc..., y por ello hay tal dispersión en los resultados bibliográficos. Así, tal y como recomiendan Gómez *et al* (2001a), resulta recomendable que su determinación sea experimental, prestando especial atención a las condiciones en las que se realiza el ensayo, ya que en condiciones de alta humedad los valores de E_c se incrementan, mientras que los de la resistencia a compresión disminuyen.

2.4. Hormigón reforzado con fibras

El hormigón reforzado con fibras (FRC) es aquel que incluye en su matriz fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, cuyo fin es mejorar algunas prestaciones, ya sea en estado fresco, primeras edades o en estado endurecido. (Ministerio de Fomento, 2008). El ACI 544.1R-96 (ACI Committee 544, 2009) lo define como aquel hormigón compuesto

mayoritariamente por cemento hidráulico, áridos y fibras discretas como refuerzo, procedentes de materiales como el acero, vidrio, polímeros orgánicos (fibras sintéticas) o de origen natural (amianto, yute).

Las fibras empezaron a emplearse hace siglos. Inicialmente, se hacía uso de pelo de caballo o paja para reforzar morteros y adobes. Ya en 1898 se desarrolló el sistema hatschek, el cual permitió la fabricación de cemento con fibras de amianto en láminas finas, conocido como fibrocemento. No obstante, más adelante se descubrió que el amianto era nocivo para la salud, por lo que empezó a emplear otros tipos de fibras, tales como metálicas o de vidrio (Greig *et al.*, 1984). Hoy en día, cada vez más se utilizan fibras poliméricas/sintéticas (de polipropileno, poliolefina, etc.)

El FRC es similar al hormigón armado convencional, el cual cose las fisuras que puedan producirse, dejando a la estructura fuera de servicio. No obstante, se sustituyen los refuerzos de pocas barras de gran diámetro, las cuales están posicionadas en direcciones determinadas, por muchas fibras de pequeña longitud y sección, localizadas y orientadas aleatoriamente en el hormigón. Estas fibras resisten los esfuerzos que les transmite el hormigón cuando éste empieza a fisurarse (Jovells, 2016).

Otra de las características más notables de la adición de fibras en el hormigón es la modificación que provocan en el mismo de su comportamiento no lineal. Este fenómeno es especialmente visible en su comportamiento a tracción, ya que pasa de ser un material frágil a un material dúctil. Las fibras influyen además en este sentido, impidiendo la apertura y propagación de fisuras; y aumentando la capacidad de mantener deformaciones sostenidas bajo acciones sin llegar al colapso (aumento de la tenacidad). Esto convierte al FRC en un material muy adecuado frente a acciones dinámicas y frente a situaciones que requieran un alto control de la fisuración.

2.4.1. Influencia de las fibras en hormigones

La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza, tipo y características geométricas de las fibras empleadas (Pujadas, Aguado and Vandewalle, 2008). De esto extraemos diferentes formas de clasificación de las fibras.

Por una parte, las fibras pueden ser clasificadas en tres tipos según su naturaleza:

- Fibras metálicas: Acero
- Fibras poliméricas: Nylon, polipropileno, poliácido nítrico, alcohol de polivinil, poliolefina.
- Fibras naturales: Asbesto, celulosa, carbono, basalto, yute, etc.

Asimismo, estas pueden clasificarse por su función:

- Fibras estructurales: Proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa. Pueden sustituir total o parcialmente a las armaduras en algunas aplicaciones, dada su contribución en los cálculos.
- Fibras no estructurales: Mejoran determinadas propiedades como el control de la fisuración por retracción, el incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros. Este tipo de fibras no se consideran en el cálculo de la sección de hormigón.

La incorporación de fibras en el hormigón altera sus propiedades tanto en estado endurecido como en estado fresco. En este sentido, el asentamiento puede disminuir entre 25 y 102 mm respecto a un hormigón convencional (ACI Committee 544, 2009). Esto supone que se modifiquen los criterios de dosificación respecto a los hormigones tradicionales.

El volumen de fibras a incorporar y su geometría afectarán principalmente al tamaño máximo del árido, a la relación grava-arena, a la cantidad de aditivos superplastificantes a emplear y a la cantidad de árido fino.

2.4.1.1. Resistencia residual

La adición de fibras en el FRC mejora sensiblemente el comportamiento pre-fisura del hormigón a tracción directa respecto a un hormigón tradicional. Asimismo, el efecto más importante en el comportamiento mecánico del hormigón tras el empleo de fibras, es el importante incremento de su resistencia residual a tracción post-fisura, debido al efecto cosido de las mismas entre las caras de las fisuras producidas (Jovells, 2016).

Una adición de fibras del 1.5% del volumen en hormigones o morteros puede suponer incrementos a tracción directa entre el 30 y el 40% (ACI Committee 544, 2009). Asimismo, la resistencia a tracción post fisura afecta a otras propiedades mecánicas como la adherencia de armaduras, la resistencia a cortante, la fatiga, etc. (Massicotte et al., 2000).

El ensayo de flexotracción a tres puntos es uno de los métodos más empleados en la caracterización de la resistencia residual y el control de calidad del FRC. Sin embargo, la elevada variabilidad de los resultados junto con la complejidad de dicho ensayo ha motivado la aparición de nuevos métodos para determinar resistencia post-fisuración del FRC. En este aspecto, el ensayo Barcelona surge como alternativa para la caracterización del FRC debido a la menor variabilidad de sus resultados, el menor consumo de material en la fabricación de probetas y la mayor simplicidad del ensayo (Galeote Moreno, de la Fuente Antequera and Aguado de Cea, 2019).

En este sentido, se pueden destacar estudios como: “*Correlation between the Barcelona test and the bending test in fiber reinforced concrete*” (Galeote et al., 2017), “*Neural network-aided prediction of post-cracking tensile strength of fibre-reinforced concrete*”(Ikumi et al., 2021), “*Correlación entre TCOB y desplazamiento axial en el ensayo Barcelona*” (Pujadas Álvarez et al., 2014). Desarrollados en el entorno de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

2.4.1.2. Resistencia a compresión

La adición de fibras tanto metálicas como sintéticas no mejora de forma significativa la resistencia a compresión del hormigón. Se pueden dar incrementos poco significativos con porcentajes de fibras elevados (mayores al 1.5% del volumen de hormigón). No obstante, la adición de fibras sí mejora la ductilidad del hormigón. Por otra parte, el módulo elástico y el coeficiente de Poisson no se ven alterados de manera importante para porcentajes de fibras inferiores al 2% del volumen del hormigón (Maccaferri, 2005).

2.4.1.3. Durabilidad

La adición de fibras en el hormigón hace que éste, al fisurarse, sufra la aparición de muchas fisuras de abertura muy inferior a la de las producidas en los hormigones sin fibras, esto supone una gran ventaja en cuanto a la durabilidad, ya que se dificulta la entrada de agentes externos que puedan perjudicar al hormigón.

En los SFRC (hormigón reforzado con fibras de acero) el mayor problema existente es el de la corrosión. No obstante, las fibras presentan una buena resistencia a la misma, ya que se encuentran protegidas en el interior de la matriz. La corrosión, de hecho, sólo afecta a las fibras que se encuentran en la capa superficial del hormigón, hasta unos dos milímetros aproximadamente desde la superficie. Esta protección es efectiva cuando el hormigón no se encuentra fisurado, ya

que al fisurarse se facilita la entrada de agentes externos que pueden aumentar la profundidad de la corrosión. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que incluso los SFRC sin fisuras expuestos a agua de mar presentan una buena resistencia a la corrosión (Serna and Arango, 2008). Estos problemas de corrosión que afectan a los SFRC no son aplicables a los PFRC (hormigón reforzado con fibras poliméricas).

2.5. Hormigón multireciclado y reciclaje de FRC

El hormigón demolido genera un volumen significativo de residuos de construcción y demolición (RCD) en todo el mundo que tiene un gran potencial para el árido grueso de hormigón. Varios estudios analizan el uso de árido grueso reciclado en el concreto de manera repetida y analizan las propiedades frescas y endurecidas de este tipo de concreto. Estos áridos se obtuvieron a partir de trituración de elementos de hormigón de origen controlado, que fueron mezclados para tener el mismo rendimiento en cada ciclo.

A continuación, se exponen las principales características sobre el hormigón multireciclado encontradas en la bibliografía por investigaciones relevantes.

En el estudio de Abreu et al. (2018), el propósito específico fue estudiar el comportamiento mecánico del hormigón diseñado con incorporación de áridos reciclados gruesos de tres ciclos sucesivos de reciclaje a dos ratios de reposición, 25% y 100%, comparándolo con el de un hormigón de referencia, una mezcla de la misma composición, pero donde todos los áridos son naturales. El análisis de propiedades de los áridos de hormigón reciclado grueso (CRCA) de múltiples ciclos de reciclaje parece señalar que empeoran a medida que aumenta el número de ciclos de reciclaje, a causa de que también aumenta la cantidad de mortero adherido.

Huda *et al* (2014) realizaron un estudio donde se produjeron tres generaciones diferentes (1^a, 2^a y 3^a) de hormigón reciclado repetido utilizando árido grueso 100% reciclado (RCA) como un reemplazo del árido grueso natural donde el RCA se recicló 3 veces durante su vida útil. es decir, el hormigón reciclado de tercera generación se fabricó con RCA, que se produjo después de 3 vaciados repetidos de hormigón reciclado con 100% RCA y luego demoliendo el hormigón endurecido.

Los resultados de la Figura 8 muestran que el hormigón reciclado repetido experimentó una resistencia a la compresión ligeramente menor que el hormigón de control; sin embargo, todas las mezclas lograron con éxito su resistencia objetivo (32 MPa) en el día 56. Otro hallazgo interesante de este estudio muestra que incluso el hormigón de tercera generación podría superar la resistencia objetivo en al menos un 25% considerando la ganancia de resistencia a largo plazo.

Además, la densidad aparente y la gravedad específica de diferentes generaciones de árido grueso reciclado repetidas disminuyeron con el aumento del número de repeticiones. La cantidad de mortero adherido influye en este fenómeno. La densidad aparente de RCA1, RCA2 y RCA3 fue 13,9%, 22,9%, 26,3% menor que la del árido grueso natural, respectivamente.

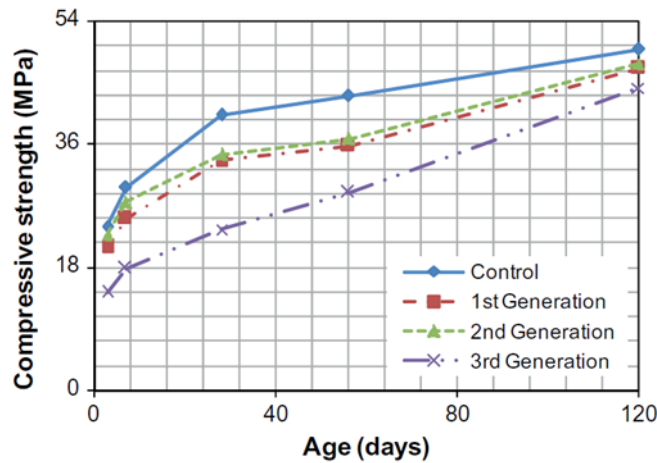


Figura 8. Resistencia a la compresión de diversas mezclas de hormigón. Fuente Huda et al (2014)

Resultados similares obtuvieron otros autores, Zhu y Lei (2014) mostraron que las propiedades de resistencia de RAC, con una resistencia de diseño de 30MPa, pueden satisfacerse cuando la calidad de los áridos gruesos y finos reciclados cumplió respectivamente con las necesidades de Grado Grade en GB/T25177-2010 y Grado III en GB/T25176-2010 con la relación de reemplazo al árido grueso natural y árido fino natural no más del 70% y 50%. Ambas resistencias disminuyeron y luego aumentaron por un tiempo antes de descender nuevamente con el aumento de la tasa de reemplazo de árido grueso reciclado, y disminuyeron continuamente con el aumento de la tasa de reemplazo de árido fino reciclado.

El tratamiento del concreto reforzado con fibra (FRC) después del período de servicio de las estructuras de hormigón llevó a Kunieda et al. (2014) a estudiar la capacidad de reciclar FRC ordinario que tiene dos tipos de fibra y un contenido de fibra diferente. Se determinó que la adición de fibras hace que el tamaño del hormigón triturado sea más pequeño y el tamaño se vuelve más pequeño al aumentar el contenido de fibra. Además, el efecto del tipo de fibra (acero y PP) sobre el tamaño de las piezas producidas no fue significativo. Eventualmente, el proceso de trituración, que corresponde al proceso de remoción del mortero, puede remover la fibra del árido reciclado, puesto que la fibra se incluye solo dentro del mortero. El efecto de la adición de fibra sobre la absorción de agua del hormigón triturado fue significativo en el caso del hormigón triturado más pequeño (tamaño de tamiz: 10 mm). Esto significa que se incluyó en el estuche árido original con menos mortero adherido (Figura 9).

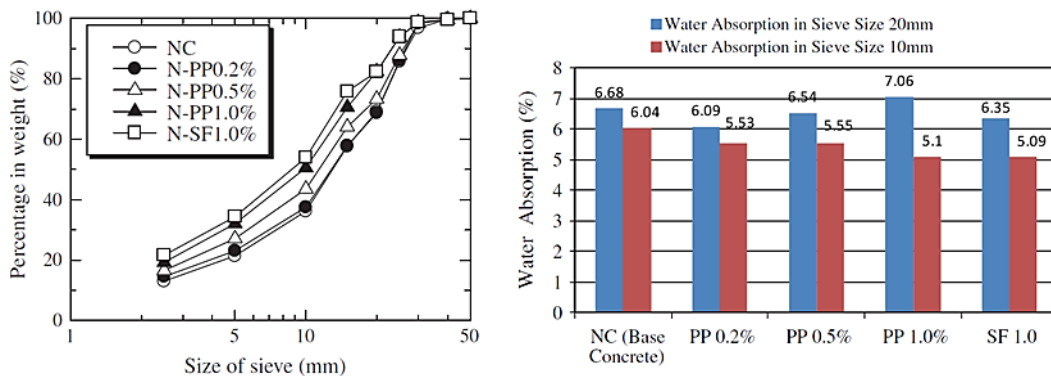


Figura 9. Distribución de tamaño de partícula y absorción de agua. Fuente: Kunieda et al. (2014)

3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El objetivo del presente capítulo consiste en describir la campaña experimental realizada, justificando las decisiones tomadas en aspectos fundamentales; así como la metodología y los materiales empleados o los ensayos previstos para la caracterización del hormigón desarrollado.

3.1. Programa experimental

El objetivo de la campaña es la investigación sobre la factibilidad del multireciclaje de hormigones fabricados con fibra poliméricas. Se van a fabricar hormigones con una resistencia de compresión $f_{cm} = 35$ MPa y con una clase de trabajabilidad S3 (slump = 125 ± 25 mm) siguiendo el esquema de Figura 10.

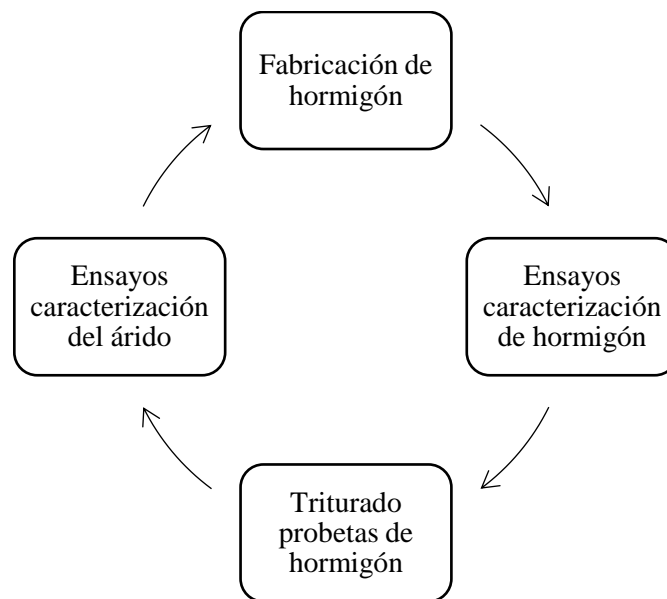


Figura 10. Diagrama cíclico de procesos del programa experimental

La campaña experimental tendrá 3 fases/generaciones de hormigones. La primera generación será el hormigón de control, constará de dos hormigones fabricados con árido natural y dos contenidos de fibras de polipropileno (0 y 6 kg/m³) denominados NAC; cada una de las generaciones siguientes constarán de hormigones fabricados con árido reciclado (RCA) proveniente de la generación anterior denominados RAC con dos contenidos de fibras de polipropileno (0 y 6 kg/m³). En la Figura 11 se muestra el diagrama de las 3 fases/generaciones de hormigones de acuerdo a la descripción que se presenta a continuación.

I Generación.

0-NAC: hormigón de referencia con 100% árido natural sin adición de fibra.

6-NAC: hormigón de referencia con 100% árido natural con fibra de polipropileno.

II Generación.

0-RAC-0: hormigón con árido reciclado 0-RCA, sin adición de fibra.

0-RAC-6: hormigón con árido reciclado 0-RCA, con fibra de polipropileno.

6-RAC-0: hormigón con árido reciclado 6-RCA, sin adición de fibra.

6-RAC-6: hormigón con árido reciclado 6-RCA, con fibra de polipropileno.

III Generación.

- 0-0-RAC-0:** hormigón con árido reciclado 0-0-RCA, sin adición de fibra.
- 0-0-RAC-6:** hormigón con árido reciclado 0-0-RCA, con fibra de polipropileno.
- 0-6-RAC-0:** hormigón con árido reciclado 0-6-RCA, sin adición de fibra.
- 0-6-RAC-6:** hormigón con árido reciclado 0-6-RCA, con fibra de polipropileno.
- 6-0-RAC-0:** hormigón con árido reciclado 6-0-RCA, sin adición de fibra.
- 6-0-RAC-6:** hormigón con árido reciclado 6-0-RCA, con fibra de polipropileno.
- 6-6-RAC-0:** hormigón con árido reciclado 6-6-RCA, sin adición de fibra.
- 6-6-RAC-6:** hormigón con árido reciclado 6-6-RCA, con fibra de polipropileno.

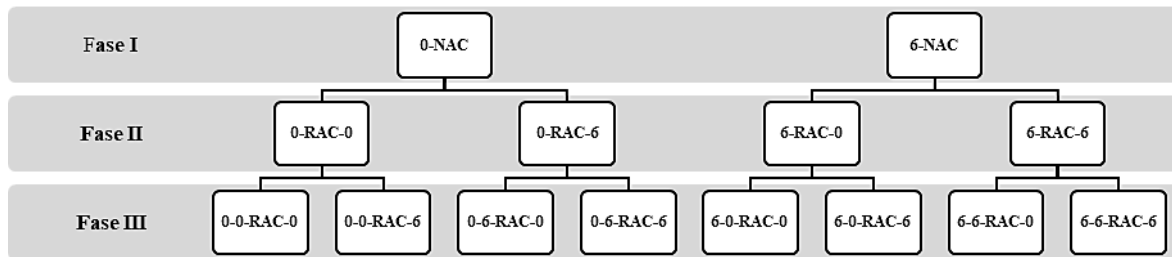


Figura 11. Diagrama de fases del programa experimental

En cada etapa se realizaron una serie de ensayos con el objetivo de determinar las propiedades tanto del hormigón, como del árido reciclado generado en cada fase. Además, se exploró la determinación del contenido de fibras y microplásticos presentes en el árido reciclado.

3.2. Materiales utilizados

3.2.1. Cemento

El cemento empleado en todas las dosificaciones realizadas durante la campaña experimental fue cemento portland del tipo CEM II/A-L 42,5 N de Cementos Molins, disponible en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC.

3.2.2. Árido natural

Para la realización de todos los hormigones, se han empleado los áridos machacados disponibles en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC. Son calizas procedentes de la cantera Vallcarca, situada en el macizo del Garraf (Barcelona). Se ha utilizado las fracciones 0/4, 4/12 y 12/20 para la primera generación de hormigón, con sustituciones de las fracciones 4/12 y 12/20 por árido reciclado en las generaciones siguientes, tal como se describe en el apartado de dosificación. En la Tabla 5 se presentan las propiedades físicas de estos áridos. Las curvas granulométricas han sido obtenidas siguiendo la metodología UNE-EN 933-2/1M:1999 y UNE-EN 933-1 (AENOR, 1999, 2012) y se presentan en la Figura 12.

Tabla 5. Propiedades del árido natural (absorción y densidad)

Propiedades del árido natural		
Tipo	Absorción de agua (%)	Densidad (kg/m ³)
Arena (0/4)	1,56	2.590
Gravilla (4/12)	0,94	2.640
Grava (12/20)	0,84	2.630

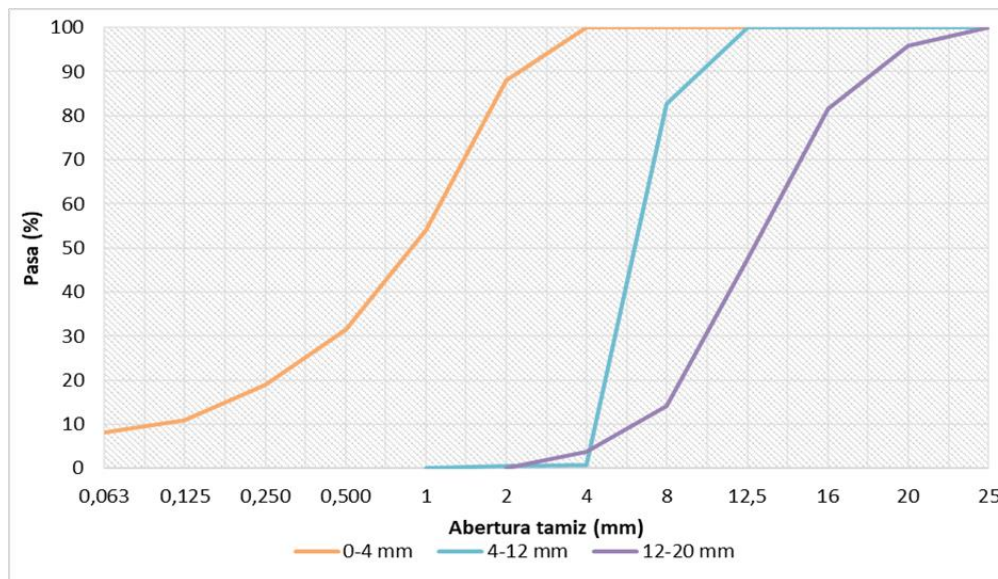


Figura 12. Curvas granulométricas del árido natural

3.2.3. Árido reciclado

Los áridos reciclados empleados en este estudio han sido generados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC, de acuerdo a lo indicado en el programa de la campaña experimental. Consta del triturado de las probetas ensayadas del hormigón de la generación anterior obteniéndose los siguientes tipos de árido reciclado.

RCA-I

0-RCA: árido reciclado obtenido a partir de 0-NAC, sin contenido fibra.

6-RCA: árido reciclado obtenido a partir de 6-NAC, con fibra.

RCA-II

0-0-RCA: árido reciclado obtenido a partir de 0-RAC-0, sin contenido fibra.

0-6-RCA: árido reciclado obtenido a partir de 0-RAC-6, con fibra en la II Generación.

6-0-RCA: árido reciclado obtenido a partir de 6-RAC-0, con fibra en la I Generación.

6-6-RCA: árido reciclado obtenido a partir de 6-RAC-6, con fibra en la I y II Generación.

3.2.4. Fibras

La selección del tipo y dosificación de las fibras dependerá de su efectividad y de su influencia en la consistencia del hormigón. En este estudio se ha empleado MasterFiber 249, que son fibras de polipropileno, pertenecientes a la empresa MBCC Group, adicionadas al hormigón en proporción de 6kg/m^3 , que corresponde a un contenido volumétrico de 0,67%



Figura 13. Fibras de polipropileno MasterFiber 249

Las fibras MasterFiber 249 son de 100% polipropileno transparente (Figura 13) de altas prestaciones por su excelente resistencia a tracción y su adherencia a la matriz de hormigón. El uso de este tipo de fibras está aconsejado tanto para hormigones tradicionales como para hormigones prefabricados. En la Tabla 6 se presentan las propiedades de estas fibras de acuerdo a la ficha técnica del fabricante.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de fibras de polipropileno MasterFiber 249

Propiedades MasterFiber 249	
Material	Polipropileno transparente.
Forma	Monofilamentada grafilada.
Diámetro equivalente	0,85 mm
Frecuencia de la fibra (ud/kg)	41200
Longitud de fibra	48 mm
Esbeltez	56,5
Resistencia a tensión	> 400 MPa. Según el método UNE-EN ISO 6892-1:2009
Densidad	0,91 g/cm ³
Módulo de elasticidad	> 6,0 GPa. Según el método UNE-EN ISO 6892-1:2009
Módulo secante	> 4,7 GPa. Según el método UNE-EN ISO 14889-2:2006
Temperatura de distorsión	110° C
Temperatura de descomposición	220-249° C
Inflamabilidad	No aplicable.
Resistencia a ácidos/álcalis	Excelente.

3.2.5. Aditivos

Tanto el hormigón con árido reciclado (RAC), como el hormigón reforzado con fibras (FRC) conlleva el empleo de aditivos ya que, de otra forma, sería muy complicado obtener consistencias trabajables en las amasadas sin modificar la cantidad de agua.

El aditivo empleado en este estudio es el MasterPozzolith 7003, que es un aditivo plastificante de nueva generación con propiedades polifuncionales, perteneciente a la empresa MBCC Group, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 7. Permite mejorar la calidad y la resistencia del hormigón y su acabado superficial, al mismo tiempo que ofrece un prolongado mantenimiento de consistencia. La dosificación habitual de MasterPozzolith 7003 es del 0,5% al 1,5% sobre el peso de cemento.

Tabla 7. Propiedades del plastificante MasterPozzolith 7003

Propiedades MasterPozzolith 7003	
Función principal	Plastificante / Reductor de agua.
Efecto secundario	Retrasa el fraguado por sobredosificación
Aspecto físico	Líquido marrón
pH, 20° C	4,5 ± 1
Densidad, 20° C	1,075 ± 0,02 g/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/100rpm	< 15 cps.
Contenido en cloruros	< 0,1%

3.3. Metodología de ensayos

3.3.1. Generación y caracterización del árido reciclado

~ Generación del árido reciclado

El árido reciclado (RCA) proviene de la trituración del hormigón realizada después de 28 días de curado en una cámara húmeda. Se utilizó una trituradora de mandíbulas como se muestra en la Figura 14 ubicada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales en el Edificio B1 (Planta S1) del Campus Norte de la UPC, y el tratamiento con el aparato se llevó a cabo solo una vez. Los hormigones con fibra requieren más cantidad de energía para triturar debido a la mayor tenacidad del material en sí. Sin embargo, en este estudio no se midió el consumo de energía para la trituración. Básicamente, debe aclararse que el proceso de trituración ordinario (máquina) se puede aplicar a la trituración hormigones con fibra sin que esto represente ningún perjuicio al material o la máquina.



Figura 14. Trituradora de mandíbulas

Además, se realizó el tamizaje para la separación de las fracciones 4/12 y 12/20 que se utilizarán como árido reciclado en sustitución del 100% del árido natural grueso en la siguiente generación. Para esto se utilizaron los tamices con apertura de 4mm, 12mm y 20mm. Se conservó el material retenido en los tamices de 4mm y 12mm, para las fracciones 4/12 y 12/20, respectivamente. Tanto el material retenido en el tamiz de 20mm, como el pasante por el tamiz de 4mm, fueron descartados.

~ **Caracterización del árido reciclado**

La caracterización de los RCA, se estableció en la determinación de las propiedades físicas, como la densidad y la absorción de agua a 1 y 24 horas, de acuerdo con las normativas especificadas en la Tabla 8. Cabe mencionar que también se realizaron ensayos para la determinación del contenido de fibras, tanto sueltas como incrustadas, en el árido reciclado. Así como también, la presencia de microplásticos. Los métodos utilizados para estos últimos se describen en el apartado 3.3.3.

Tabla 8. Métodos de ensayos propiedades físicas del árido reciclado

Propiedades	Método / Normativa
Contenido de finos	UNE-EN 933-1:2012
Granulometría	UNE-EN 933-1:2012
	UNE-EN 933-2/1M:1999
Densidad	UNE-EN 1097-6:2014
Absorción 1 hora / 24 horas	

3.3.2. Caracterización del hormigón

~ **Ensayo de consistencia de hormigón en estado fresco**

Una vez finalizado el proceso de amasado, en todas las amasadas se procedió inmediatamente a la realización del ensayo de consistencia del hormigón fresco por el método del cono de Abrams, según la norma UNE-EN 12350-2:2020 (AENOR, 2020a).

~ **Ensayos de caracterización del hormigón en estado endurecido**

A continuación, en la Tabla 9 se indican las normas o metodologías de referencia empleadas para llevar a cabo cada uno de los ensayos. Se describirán los equipos y condiciones de operación seguidas durante estos ensayos; en el caso de seguir procedimientos descritos en alguna norma, tan sólo se hará referencia a la misma. En la Tabla 10 se muestran las propiedades estudiadas del hormigón, así como las edades de ensayos, tipo de probetas utilizadas y el número de ellas en cada determinación.

Tabla 9. Métodos de ensayos propiedades mecánicas hormigón

Propiedades	Método / Normativa
Resistencia a la compresión (f_c)	UNE-EN 12390-3:2020
Resistencia a tracción indirecta (f_{ct})	UNE-EN 12390-6:2010
Módulo de elasticidad (E_c)	UNE-EN12390-13:2014
Ensayo Barcelona (BCN)	UNE 83515:2010

Los diferentes ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales situado en el Edificio C1 (Planta baja y Plantas S1 y S2) del Campus Norte de la UPC, empleando la máquina de ensayos de compresión Ibertest de 3 MN de capacidad de carga, que permite tanto el control del ensayo por carga o por desplazamiento, mostrada en la Figura 15a. Para uniformizar las caras de ensayo eliminando irregularidades en la superficie, se empleó una pulidora de probetas (Figura 15b).

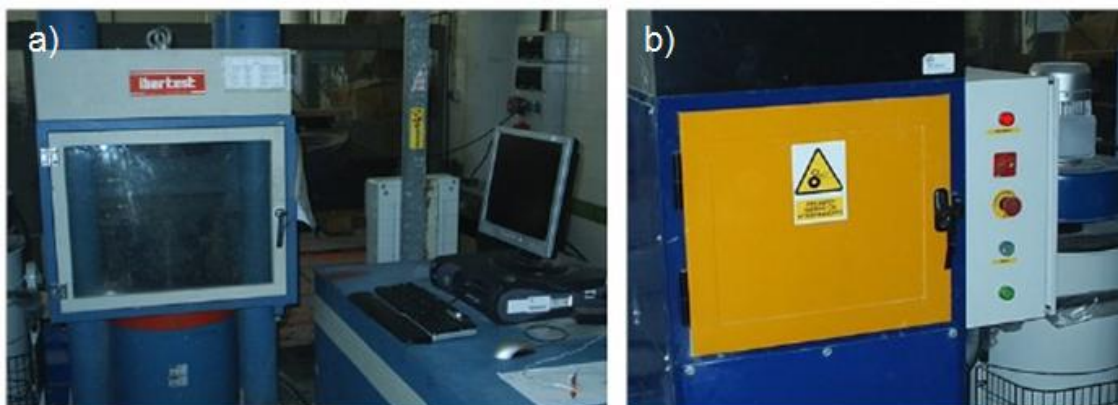


Figura 15. Máquina determinación propiedades mecánicas, a) Prensa Ibertest y b) Pulidora de probetas

Tabla 10. Plan de ensayos propiedades mecánicas en probetas

Tipo de hormigón	Ensayo							Observaciones
	f_c		f_{ct}		E_c		BCN	
	7 días	28 días	7 días	28 días	7 días	28 días	28 días	
	Numero de probetas							
0-NAC	3	3	3	3	3 ^(a)		6	Probetas cilíndricas de 150×300mm para f_c , f_{ct} y E_c , Ø150/150 mm para BCN a no ser que se indique lo contrario. (a) ambas edades sobre la misma probeta. (b) las mismas probetas usadas para E . (c) 3 probetas cilíndricas de 150×300mm + 3 de 100×200mm. (d) probetas cilíndricas de 100×200mm. (e) las mismas probetas usadas para f_c .
6-NAC	3	3	3	3	3 ^(a)		6	
0-RAC-0	3+3 ^(c)	3+3 ^(c)	-	3 ^(b)	3 ^(a)		6	
0-RAC-6	3+3 ^(c)	3+3 ^(c)	-	3 ^(b)	3 ^(a)		6	
6-RAC-0	3 ^(d)	3 ^(d)	-	3 ^(b)	3 ^(a)		6	
6-RAC-6	3 ^(d)	3 ^(d)	-	3 ^(b)	3 ^(a)		6	
0-0-RAC-0	3 ^(d)	3 ^(d)	-	3 ^(b)	3 ^(a, d)		6	
0-0-RAC-6	3 ^(d)	3 ^(d)	-	3 ^(b)	3 ^(a, d)		6	
0-6-RAC-0	3 ^(d)	3 ^(d)	-	3 ^(b)	3 ^(a, d)		6	
0-6-RAC-6	3 ^(d)	3 ^(d)	-	3 ^(b)	3 ^(a, d)		6	
6-0-RAC-0	-	3 ^(d)	-	3 ^(b)	-	3 ^(d)	5	
6-0-RAC-6	-	3 ^(d)	-	3 ^(b)	-	3 ^(d)	5	
6-6-RAC-0	-	3 ^(d)	-	-	-	3 ^(d, e)	5	
6-6-RAC-6	-	3 ^(d)	-	-	-	3 ^(d, e)	5	

El ensayo de **resistencia a compresión** se realizó en tres probetas cilíndricas de cada dosificación, a edades de 7 y 28 días, siguiendo la norma UNE-EN 12390-3:2020 (AENOR, 2020b). La carga aplicada sobre las probetas se incrementa a velocidad constante, e igual a 0,5 MPa/s.

La determinación del **módulo de elasticidad** se realizó en tres probetas cilíndricas de cada dosificación, a edades de 7 y 28 días, de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-13:2014 (AENOR, 2014). Las probetas analizadas fueron sometidas a tres ciclos de carga a compresión, con sendos escalones de 30 segundos de duración, durante los cuales se aplicó sobre la probeta una compresión constante de aproximadamente el 30% de la carga de rotura. Finalmente, la pendiente de la relación entre la tensión aplicada (σ) y la deformación sufrida (ϵ) proporciona el valor del módulo de elasticidad E.

Aprovechando el carácter no destructivo del ensayo de módulo de elasticidad, se decidió determinar sobre una misma probeta dos propiedades básicas de un hormigón: el módulo de elasticidad, y posteriormente, la resistencia a tracción, tanto en la II Generación, como en la III Generación. Esto debido a la falta de disponibilidad de árido reciclado que limitó el volumen de producción de las mezclas para los hormigones de la siguiente generación.

La resistencia a **tracción indirecta**, o **ensayo Brasileño**, se realiza en la misma prensa utilizada en los ensayos de compresión, adaptada con un bastidor específico para la aplicación de la carga en el eje longitudinal de la misma de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-6:2010 (AENOR, 2010b). La velocidad de carga en este caso es de 3,5 kN/s. Se realizó en tres probetas cilíndricas, a edades de 7 y 28 días para la I Generación y 28 días para la II y III Generación, salvo el caso de 6-6-RAC-0 y 6-6-RAC-6 en que no fue posible realizar el ensayo.

El **Ensayo Barcelona** permite determinar la resistencia a fisuración, la tenacidad y la resistencia residual a tracción de hormigones reforzados con fibras, mediante un ensayo de doble punzonamiento, midiendo el desplazamiento en la circunferencia de la probeta con una cadena extensométrica. Se realizó siguiendo la norma UNE 83515:2010 (AENOR, 2010a) en probetas cilíndricas. Aunque el ensayo “estándar” para FRC es de la flexotracción (UNE-EN 14651:2007+A1:2008), en este estudio se optó por el ensayo Barcelona porque exige menos hormigón, dado la limitación que existía respecto a la cuantía de árido reciclado disponible.

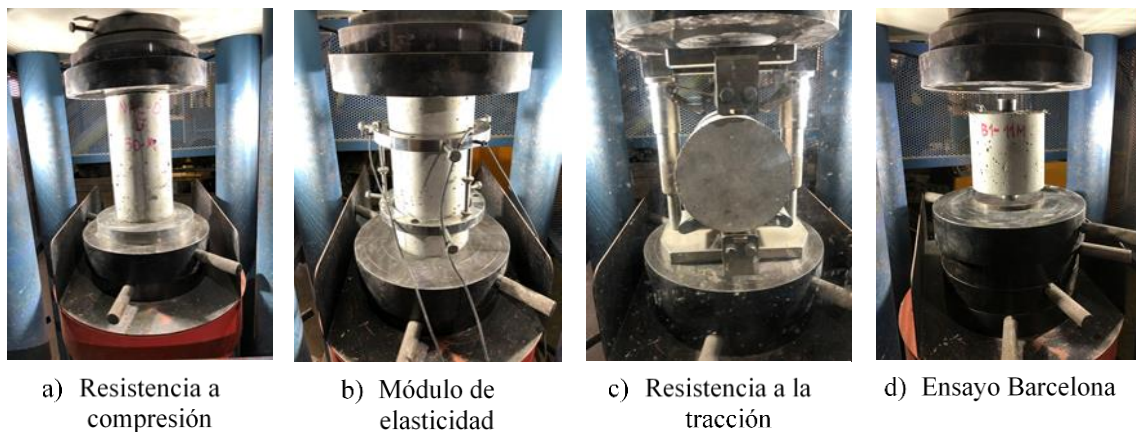


Figura 16. Ensayos propiedades mecánicas del hormigón

3.3.3. Contenido de fibras y detección de microplásticos

Para el caso de los FRC, luego del proceso de trituración, se han analizado dos propiedades: contenido de fibras y detección de microplásticos mediante métodos alternativos que se describen a continuación.

~ Contenido de fibras

La determinación de la cuantía de fibras presentes en el árido se realizó de dos maneras, en primer lugar, se determinó la cuantía de fibras libres y, en segundo lugar, la cuantía de fibras incrustadas en la matriz del árido. Cabe mencionar que la determinación de estas cuantías es meramente experimental, con el objetivo de analizar la viabilidad futura de la recuperación de fibras para su reutilización en nuevos FRC. Sin embargo, en este estudio no se ha considerado estos valores de cuantía para realizar ajustes o compensaciones en la dosificación de las nuevas mezclas de hormigón.

Para la cuantía de fibras libres se han utilizado dos métodos: la separación manual y la técnica de flotación como se observan la Figura 17.

- Separación manual: este se realiza en el RCA una vez separadas las fracciones. Consiste en la separación manual de las fibras libres en una muestra de RCA de cada fracción. Posteriormente se pesa la muestra de fibras y se determina la cuantía expresada en kg de fibra por kg de árido (kg/kg).
- Técnica de flotación: esta se realiza en el RCA antes de separar las fracciones. Consiste en la separación física, por diferencia de densidades, de las fibras libres al sumergir una muestra de RCA en agua. Se encontró que el método era factible agitando la muestra, de esta forma las fibras, al tener menor densidad que el agua, flotan en la superficie. Posteriormente se recogen las fibras de forma manual y se llevan a secar en horno a 100° C por 24 horas. Una vez seca, se pesa la muestra de fibras y se determina la cuantía expresada en kg de fibra por kg de hormigón (kg/kg).



Figura 17. Técnica determinación cuantía de fibras libres: a) Separación manual, b) Flotación

Para la cuantía de fibras incrustadas se ha optado por: el conteo manual y la técnica de quema/incineración.

- Conteo manual: consiste en el conteo manual de las fibras libres en una muestra de RCA de cada fracción. Una vez contabilizadas, y conociendo la frecuencia de la fibra (ud/kg), dato indicado en la ficha técnica, se realiza la estimación de la cuantía expresada en kg de fibra por kg de árido (kg/kg).

- Técnica de quema/incineración: esta consiste en colocar una muestra de RCA de cada fracción, sin tratamiento previo, en horno a 220° C (temperatura de descomposición indicada en ficha técnica de fibras utilizadas) por un periodo de 24 horas. La estimación de la cuantía se define como la diferencia de peso de la muestra antes y después del horno, expresada en kg de fibra por kg de árido (kg/kg).

~ Detección de microplásticos

Los microplásticos son pequeñas piezas de plástico, en este caso particular, generados por el proceso de trituración del FRC en el que se desprenden pequeñas partículas de plástico de las fibras de polipropileno utilizadas en la mezcla. Aunque aún se debate a partir de qué tamaño puede considerarse microplásticos, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) utiliza el parámetro de menos de 5 mm de diámetro para clasificarlos.

Para la detección de microplásticos se ha optado por la técnica descrita en la investigación realizada por Correia et al., (2019) que abarca una revisión bibliográfica de métodos de muestreo y detección de microplásticos en agua y sedimento. El estudio indica que el filtrado o tamizado es el método más frecuente en la separación de microplásticos de muestras de agua y para el sobrenadante que contiene plásticos de la separación por densidad de muestras de sedimentos. El tamaño de los poros del filtro o la malla del tamiz pueden variar mucho y determina el tamaño más bajo de los microplásticos detectados. Sin embargo, los tamaños pequeños de poros o mallas también pueden resultar en una rápida obstrucción por materia orgánica y mineral.

Siguiendo lo descrito anteriormente, se ha optado por realizar una combinación entre dos técnicas descritas para la cuantía de fibras: la filtración y la quema/incineración. Aprovechando la muestra de la técnica de filtrado para la determinación de las fibras libres, se ha de filtrar el agua de dicha muestra a través de los tamices de 5 y 0,125 mm. Por encima de 5 mm se consideran fibras libres, entre 5 y 0,125 mm se considera microplásticos.

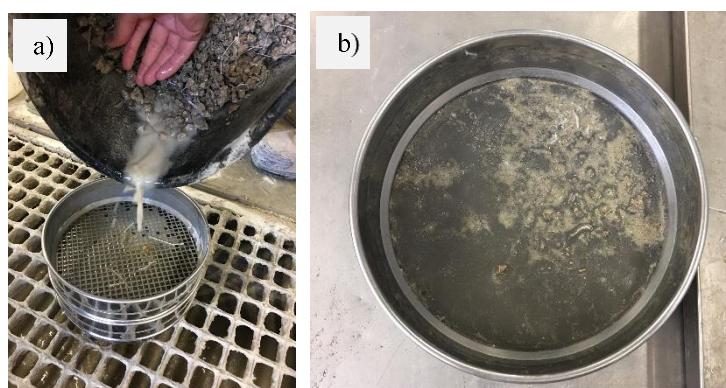


Figura 18. a) Proceso de filtrado, b) muestra microplásticos retenida en tamiz de 0,125 mm

La muestra retenida en el tamiz de 0,125 mm se ha llevado a secar en horno a 100° C por 24 horas. Posteriormente se ha llevado a horno a 220° C por un periodo de 24 horas con el objetivo de “quemar” las micropartículas de plástico. La estimación de la cuantía se define como la diferencia de peso de la muestra antes y después del horno a 220° C, expresada en g de microplásticos por m³ de hormigón (g/m³).

3.4. Dosificación

Los criterios de dosificación considerados se guían de acuerdo a lo establecido en la normativa EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008) para hormigones con resistencias $f_{cm} = 35$ MPa y con una clase de trabajabilidad S3 (slump = 125 ± 25 mm). Las dosificaciones para cada tipo de mezcla son calculadas mediante la determinación de cada uno los componentes en peso para la obtención de 1 m^3 de volumen de hormigón.

La dosificación para cada tipo de árido se realiza en función de la granulometría del material a emplear, utilizando como referencia las curvas de Fuller (Fuller and Thompson, 1907) y Bolomey (Bolomey, 1935), con ajustes en la proporción de cada fracción. Se ha realizado un mix de áridos para cada mezcla de hormigón en función de la curva granulométrica y cuantía de RCA disponible (sección 4.1) como se detalla en la Tabla 11 a fin de intentar ajustar las curvas de cada mix a las curvas de referencia anteriormente mencionadas (Figura 19).

Tabla 11. Mix de áridos

Fracción	Mix áridos						
	NA	0-RCA	6-RCA	0-0-RCA	0-6-RCA	6-0-RCA	6-6-RCA
0/4	45%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
4/12	15%	32%	32%	32%	32%	35%	40%
12/20	40%	28%	28%	28%	28%	25%	20%

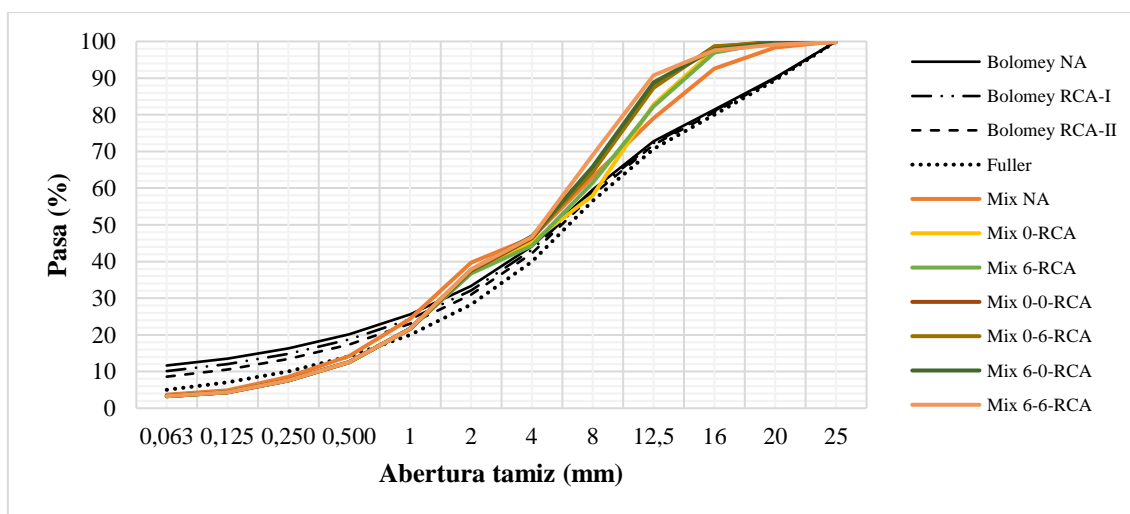


Figura 19. Curvas granulométricas mix de áridos para mezclas de hormigón

En este estudio se han realizado 14 mezclas distintas; 2 mezclas en la I Generación (Tabla 12), 4 mezclas en la II Generación (Tabla 13), y 8 mezclas en la III Generación (Tabla 14). Para todas las mezclas se ha considerado un contenido constante de cemento de 350 kg/m^3 y una relación a/c efectiva de 0,5 realizando aportes de agua de compensación relacionada a la absorción de cada tipo de RCA. El contenido de aditivo plastificante se ha establecido en 0,4% del peso de cemento, pudiendo realizar ajustes a un máximo de 1% durante el proceso de fabricación.

Tabla 12. Dosificación hormigón I Generación

Material		Mezcla	
		0-NAC	6-NAC
		Cantidad (kg/m3)	
Árido Natural (NA)	0/4	816,07	796,46
	4/12	272,02	265,05
	12/20	725,39	707,97
Agua total (a _{ef.} + a _{abs})		175,0 + 21,38	175,0 + 20,87
Cemento		350,00	350,00
(a/c) _{ef}		0,5	0,5
Plastificante		1,40	2,70
Fibras		0,00	6,00
Vol. aire (%) estimado		2,0	3,0
Vol. Amasado (L)		120,00	120,00

Tabla 13. Dosificación hormigón II Generación

Material		Mezcla			
		0-RAC-0	0-RAC-6	6-RAC-0	6-RAC-6
		Cantidad (kg/m3)			
Árido Natural (NA)	0/4	673,79	657,61	677,90	661,62
Árido Reciclado (RCA)	4/12	539,04	526,09	542,32	529,30
	12/20	471,66	460,33	474,53	463,13
Agua total (a _{ef.} + a _{abs})		175,0 + 68,79	175,0 + 67,14	175,0 + 62,5	175,0 + 60,99
Cemento		350,00	350,00	350,00	350,00
(a/c) _{ef}		0,5	0,5	0,5	0,5
Plastificante		0,00	1,40	0,00	1,40
Fibras		0,00	6,00	0,00	6,00
Vol. aire (%) estimado		2,0	3,0	2,0	3,0
Vol. Amasado (L)		81,00	81,00	48,00	48,00

Tabla 14. Dosificación hormigón III Generación

Material		Mezcla							
		0-0-RAC-0	0-0-RAC-6	0-6-RAC-0	0-6-RAC-6	6-0-RAC-0	6-0-RAC-6	6-6-RAC-0	6-6-RAC-6
		Cantidad (kg/m3)							
Árido Natural (NA)	0/4	643,04	627,60	640,60	625,21	649,20	633,61	644,48	629,00
Árido Reciclado (RCA)	4/12	514,43	502,08	512,48	500,17	568,05	554,41	644,48	629,00
	12/20	450,13	439,32	448,42	437,65	405,75	396,01	322,24	314,50
Agua total (a _{ef.} + a _{abs})		175,0 + 99,61	175,0 + 97,21	175,0 + 98,91	175,0 + 96,54	175,0 + 91,81	175,0 + 89,60	175,0 + 90,36	175,0 + 88,19
Cemento		350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00
(a/c) _{ef}		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Plastificante		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fibras		0,00	6,00	0,00	6,00	0,00	6,00	0,00	6,00
Vol. aire (%) estimado		2,0	3,0	2,0	3,0	2,0	3,0	2,0	3,0
Vol. Amasado (L)		33,00	33,00	33,00	33,00	25,00	25,00	21,00	21,00

3.5. Fabricación

El proceso de fabricación se realizó siguiendo las dosificaciones presentadas en el apartado anterior. Las amasadas se fabricaron en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales, situado en el Edificio C1 (Planta baja y Plantas S1 y S2) del Campus Norte de la UPC, utilizando una amasadora de 35 litros de capacidad máxima recomendada, por lo que fue necesario, en los casos en que el volumen de mezcla era superior a dicha capacidad, dividir la mezcla en varias amasadas. En la Tabla 15 se presenta la distribución de amasadas y la fecha de realización de las mismas.

Tabla 15. Distribución de amasadas y fecha de realización

Tipo mezcla	Fecha	Amasadas	
		No.	Volumen (L)
0-NAC	30/03/2021	4	30,00
6-NAC	06/04/2021	4	30,00
0-RAC-0	10/05/2021	3	27,00
0-RAC-6	10/05/2021	3	27,00
6-RAC-0	12/05/2021	2	24,00
6-RAC-6	12/05/2021	2	24,00
0-0-RAC-0	28/06/2021	1	33,00
0-0-RAC-6	28/06/2021	1	33,00
0-6-RAC-0	29/06/2021	1	33,00
0-6-RAC-6	02/07/2021	1	33,00
6-0-RAC-0	29/06/2021	1	25,00
6-0-RAC-6	02/07/2021	1	25,00
6-6-RAC-0	30/06/2021	1	21,00
6-6-RAC-6	30/06/2021	1	21,00

Una vez preparados todos los componentes y las herramientas, se procedía a realizar las amasadas. El primer paso era humedecer la amasadora. Tras esto, se preparaban y separaban los componentes en capazos de acuerdo a la cantidad base calculada, se vertían en la misma los áridos junto al cemento. Tras 2 minutos de mezclado, se añadía aprox. $\frac{2}{3}$ de la cantidad del agua y se amasaba adecuadamente por otros 2 minutos.

Cuando la mezcla alcanzaba una homogeneidad adecuada se procedía a añadir poco a poco el aditivo plastificante y el resto del agua. Una vez éste había reaccionado, se añadían las fibras correspondientes (si era el caso), se esperaba a que la mezcla se homogeneizase de nuevo y se procedía a realizar la comprobación de consistencia por cono de Abrams, si el resultado ha sido satisfactorio, se procedía al llenado de los moldes previamente engrasados con desencofrante. En la Figura 20 se muestran algunas fotos del proceso.



Figura 20. Proceso de fabricación mezclas hormigón

El desmolde de las probetas fabricadas se produjo a las 24 h de su fabricación, sin que se produjese en el proceso ninguna incidencia remarcable. Al finalizar el desmolde, las probetas se etiquetaron e introdujeron en la cámara húmeda (Figura 21), para asegurar un curado adecuado bajo unas condiciones de humedad (95%) y temperatura (20° C) controladas.



Figura 21. Desmolde y curado de probetas en cámara húmeda

4. RESULTADOS

A continuación, se exponen los principales resultados de los ensayos descritos anteriormente en el apartado de campaña experimental, obtenidos tras la realización y estudio de todas las amasadas propuestas. La estructura de estos resultados se configura atendiendo a los diversos parámetros medidos inicialmente en los áridos, y posteriormente en las amasadas en estado fresco y endurecido, analizando el efecto de la adición de fibras y el aumento de ciclos de reciclaje en sus propiedades físico-mecánicas.

Referente a los áridos, se ha determinado la cuantía de árido por fracción, la distribución de partículas mediante curvas granulométricas de acuerdo a la norma UNE-EN 933-1:2012 y las propiedades de densidad y absorción de agua según la norma UNE-EN 1097-6:2014.

En cuanto a los ensayos del hormigón en estado fresco, se ha realizado la prueba de consistencia de cono de Abrams. En estado endurecido, han sido el ensayo de resistencia a compresión simple según la norma UNE-EN 12390-3:2020, el ensayo de tracción indirecta según la norma UNE-EN 12390-6:2010, el ensayo de módulo de elasticidad según la norma UNE-EN 12390-13:2014 y, por último, el ensayo Barcelona según la norma UNE 83515:2010.

Por último, se presentan los resultados, como prueba piloto, del contenido de fibras y detección de microplásticos presentes en el árido mediante métodos alternativos descritos en el apartado de metodologías de ensayos.

4.1. Caracterización del árido reciclado

4.1.1. Obtención del árido reciclado

La trituración del hormigón se realizó a la edad de 28 días en cada generación catalogando cada tipo de árido y separando posteriormente las fracciones 4/12 mm y 12/20 mm. El proceso de trituración requirió alrededor de 20 segundos por probeta en hormigones sin contenido de fibras, llegando hasta los 40 segundos para hormigones con mayor contenido de fibras. En la Tabla 16 se resumen los pesos de las muestras antes y después del proceso de trituración, y en la Tabla 17 los pesos de las fracciones 4/12 mm y 12/20 mm después del tamizaje.

Tabla 16. Tasa de recolección de árido reciclado de hormigón

	Tipo de hormigón	(a) Peso total antes de triturado (kg)	(b) Peso total después de triturado (kg)	(b/a) Tasa de recolección (%)
I Generación	0-NAC	260,90	253,48	97%
	6-NAC	259,32	241,25	93%
II Generación	0-RAC-0	165,62	157,73	95%
	0-RAC-6	167,45	147,02	88%
	6-RAC-0	102,29	96,51	94%
	6-RAC-6	98,45	89,47	91%

Tabla 17. Tasa de reciclaje del hormigón en árido reciclado por fracción

Tipo de árido	Tipo de hormigón	(b) Peso total después de triturado (kg)	(c) Peso total fracción 4/12 (kg)	(d) Peso total fracción 12/20 (kg)	Peso material descartado (kg)	[(c + d) / b] Tasa de recuperación árido grueso (%)
0-RCA	0-NAC	253,48	113,46	79,42	60,60	76%
6-RCA	6-NAC	241,25	102,98	53,63	84,63	65%
0-0-RCA	0-RAC-0	157,73	64,11	46,84	46,79	70%
0-6-RCA	0-RAC-6	147,02	60,36	33,77	52,89	64%
6-0-RCA	6-RAC-0	96,51	36,89	24,86	34,76	64%
6-6-RCA	6-RAC-6	89,47	33,93	17,19	38,35	57%

Las pérdidas producidas en el proceso de triturado de las probetas han sido de media inferior al 10%. Respecto a la tasa de recuperación, esta muestra una relación entre el contenido de fibras del hormigón y el número de ciclo de reciclaje. Teniendo valores de entorno al 70-76% para hormigones sin fibra, con una disminución al 64-65% para hormigones con fibra en una sola generación. El valor más bajo obteniendo ha sido de 57% para 6-6-RCA que es el que mayor contenido de fibras tiene; lo cual sugiere una relación directa entre el contenido de fibras y el tamaño de partícula después del triturado. Esta disminución en 6-6-RCA ha sido la razón por la que fue necesario disminuir el volumen de mezcla fabricada para los hormigones de la tercera generación con este árido, debido a que se disponía de menos material utilizable.

El peso del material descartado corresponde a la suma de las partículas de tamaño < 4 mm y > 20 mm donde, aproximadamente un 90% corresponde a partículas de tamaño < 4 mm. En la Figura 22 se expresa el porcentaje de cada fracción según el tipo de árido.

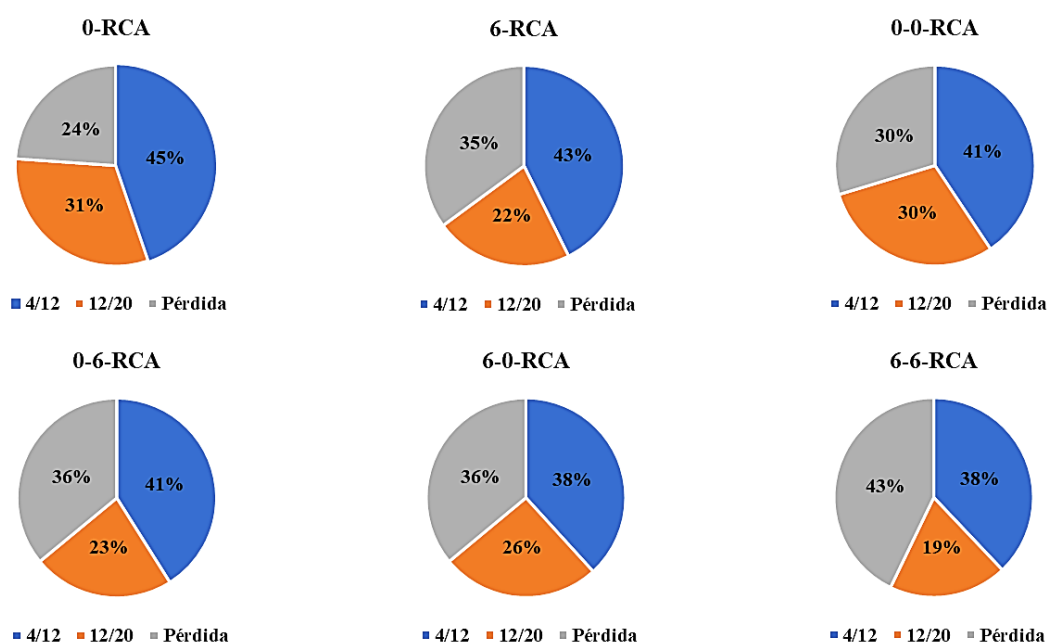


Figura 22. Distribución tamaño de partículas del árido reciclado RCA

Se puede apreciar una distribución de partículas ligeramente diferente entre los áridos con y sin fibras, con una disminución, más que nada, en la fracción 12/20 mm a medida que aumenta el contenido de fibras en el árido. Esto debido a un aumento de partículas de tamaño >20 mm (incluidas como pérdida). Sin embargo, la realidad es que son pequeñas partículas agregadas unidas con varias fibras incrustadas, como se aprecia en la Figura 23, que resultan retenidas en el tamiz de 20 mm. La Figura 24 muestra el aspecto general de cada fracción según el tipo de RCA.



Figura 23. Retención de árido debido a fibra

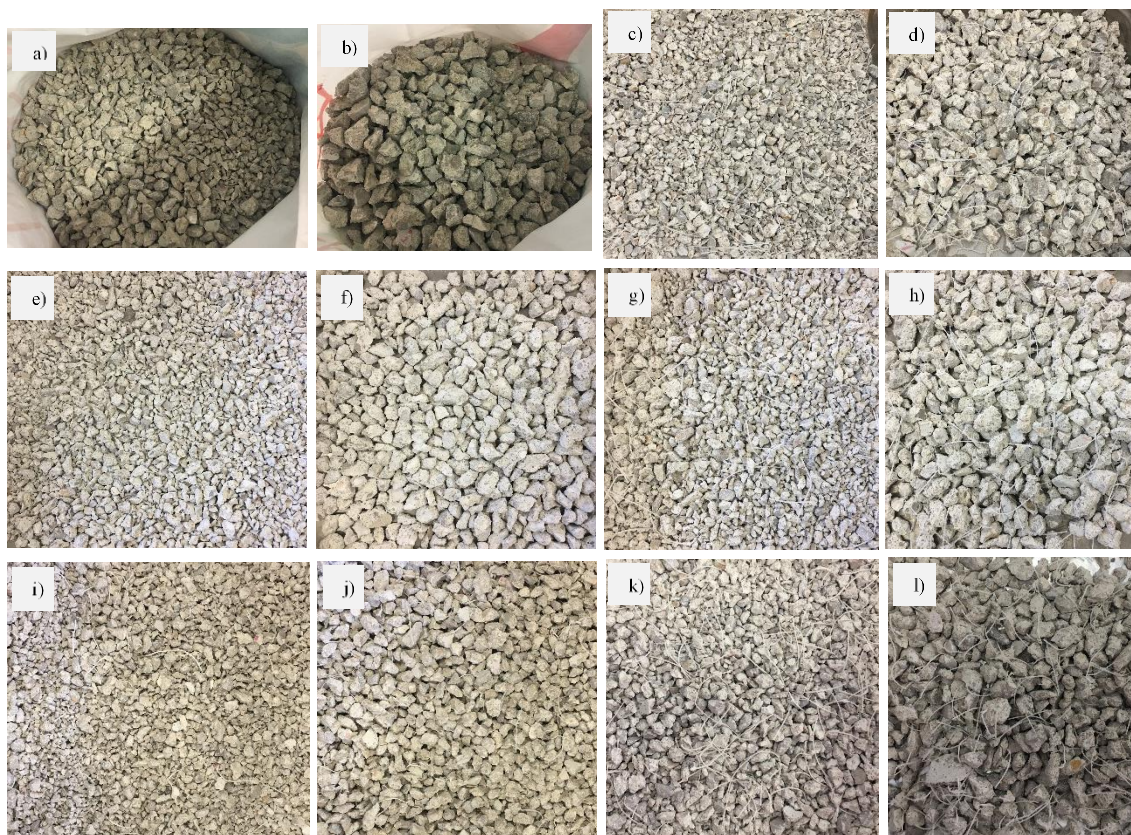


Figura 24. Aspecto del RCA: a) 4/12mm de 0-RCA, b) 12/20mm de 0-RCA, c) 4/12mm de 6-RCA, d) 12/20mm de 6-RCA, e) 4/12mm de 0-0-RCA, f) 12/20mm de 0-0-RCA, g) 4/12mm de 0-6-RCA, h) 12/20mm de 0-6-RCA, i) 4/12mm de 6-0-RCA, j) 12/20mm de 6-0-RCA, k) 4/12mm de 6-6-RCA, l) 12/20mm de 6-6-RCA

4.1.2. Granulometría

El estudio de las características geométricas de los áridos se ha centrado en la determinación de su granulometría. En la Figura 25 se presentan las curvas granulométricas del árido grueso por ciclo de reciclaje de cada tipo de RCA, comparándolas con la curva del árido grueso (NA). Se observa que no existe diferencia significativa entre los diferentes RCA. Como se describe en el apartado anterior, donde prácticamente todos los RCA presentan cuantías similares de las diferentes fracciones, era de esperarse que las curvas granulométricas fueran muy similares.

Respecto a la comparación con los áridos naturales, los RCA presentan una buena graduación, siendo los del 2do ciclo de reciclaje los que más se ajustan a la curva de árido natural.

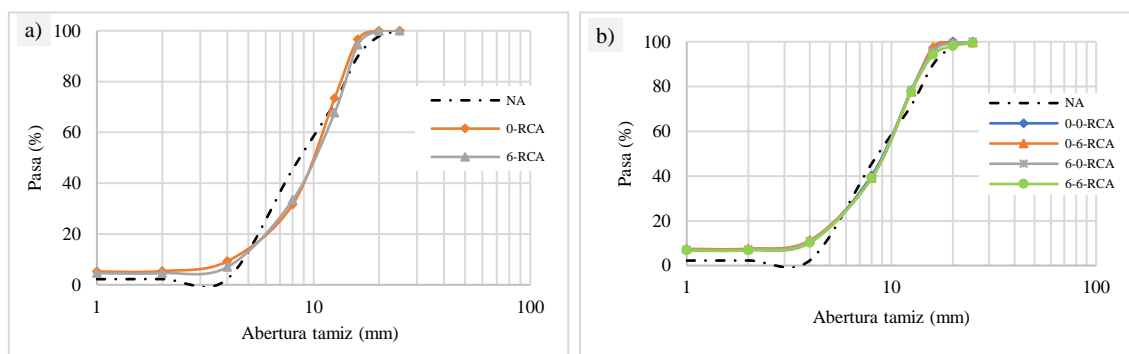


Figura 25. Curva granulométrica RCA: a) 1er ciclo de reciclaje, b) 2do ciclo de reciclaje

4.1.3. Densidad y Absorción

De acuerdo al Catálogo de residuos utilizables en construcción (CEDEX, 2014), por lo general, la densidad del árido reciclado es muy similar a la del hormigón original de donde proceden y ligeramente menor, entre un 5-10%, que la densidad del árido natural utilizado para la fabricación de dicho hormigón. Con respecto a la absorción, los valores más habituales para los áridos reciclados de hormigón varían entre 4-9%. Es importante destacar la heterogeneidad en los valores de dichas propiedades, debido fundamentalmente a las distintas características del hormigón de donde se originan.

Los resultados de los ensayos de densidad y absorción de agua (Tabla 18 y Figuras 26-27) muestran un comportamiento de acuerdo a lo esperado, con una disminución de la densidad de los RCA de un 9% frente a los áridos naturales, obteniéndose valores de densidad de $2336 \pm 26 \text{ kg/m}^3$ para los áridos reciclados RCA-I y $2174,2 \pm 52,3 \text{ kg/m}^3$ para los áridos reciclados RCA-II. Igualmente, se observa que la densidad se reduce ligeramente al hacerlo el tamaño del árido, aunque dicha diferencia no es significativa. En cambio, se presenta claramente un aumento en la absorción de agua en los áridos reciclados frente a los de los naturales a medida que aumenta el ciclo de reciclaje. La absorción de agua a 24 horas de RCA-I y RCA-II es $5,3 \pm 0,7\%$ y $8,8 \pm 0,8\%$, respectivamente, encontrándose cerca de los rangos habituales. Aunque la fracción 4/12 presenta una mayor absorción que la 12/20, esta diferencia es de apenas un 0,5% de media en todos los ciclos (Figura 27).

Otra propiedad analizada es la absorción a 1 hora, con el objetivo de predecir el comportamiento del árido durante un periodo del amasado de la mezcla de hormigón, que puede corresponder al tiempo de transporte en la práctica desde una planta hasta el sitio de la obra y realizar los ajustes correspondientes en la compensación de agua de la mezcla para asegurar una trabajabilidad adecuada. No se observó diferencia significativa entre los valores de absorción a 1 hora y 24 horas, llegando a alcanzarse en 1 hora más del 90% de la capacidad de absorción a 24 horas. Esto

indica una matriz “débil” del hormigón “original” y que casi toda la porosidad era “abierta” (es decir conectada con el exterior). Por lo cual se consideró para la dosificación en la mezcla de hormigón utilizar los valores de absorción a 24 horas.

Tabla 18. Valores de densidad y absorción del árido reciclado

	Tipo de árido	Densidad seca (kg/m ³)		Absorción 1h (%)		Absorción 24h (%)	
		4/12	12/20	4/12	12/20	4/12	12/20
	NA	2.640	2.630	-	-	0,94	0,84
RCA-I	0-RCA	2.310	2.328	6,01	5,51	6,00	5,49
	6-RCA	2.332	2.362	5,46	4,45	5,47	4,69
RCA-II	0-0-RCA	2.132	2.142	9,43	9,18	9,52	9,02
	0-6-RCA	2.123	2.122	9,39	9,32	9,45	9,03
	6-0-RCA	2.126	2.226	8,40	8,27	8,50	8,23
	6-6-RCA	2.138	2.149	8,23	7,78	8,45	8,02

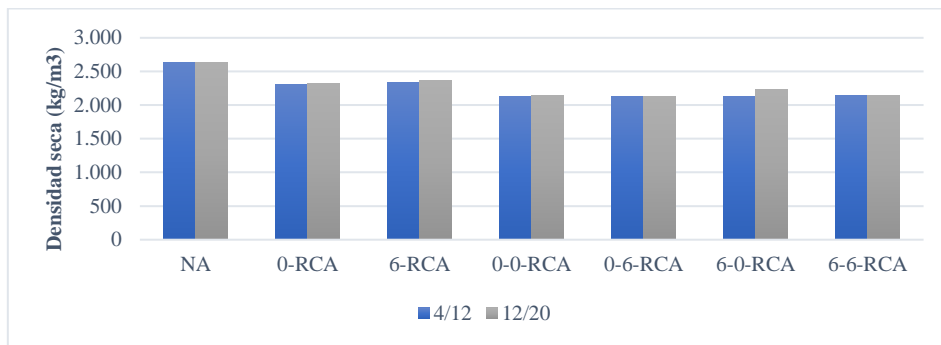


Figura 26. Evolución de la densidad por tipo de árido

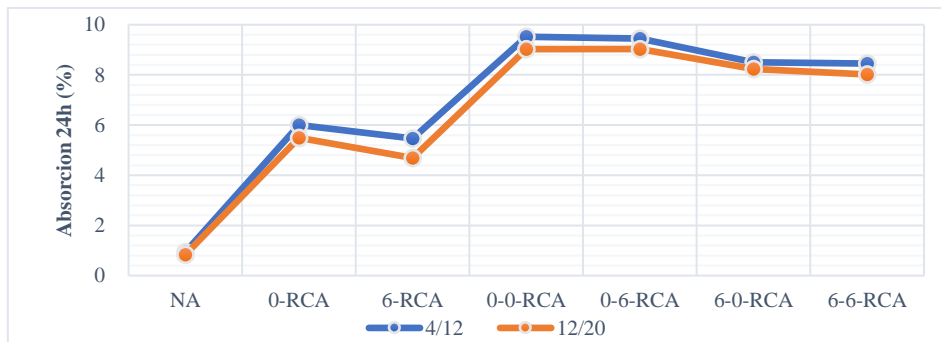


Figura 27. Evolución de la absorción de agua por tipo de árido

La disminución de la densidad y los altos valores de absorción de los RCA se debe, principalmente, a la pasta de cemento adherida que permanece como residuos en la superficie del árido natural después del proceso de trituración y reciclaje. Dado que la cantidad de mortero adherido aumenta con el número de ciclos de reciclaje, la densidad de las próximas generaciones de áridos gruesos ira disminuyendo en comparación con la anterior; mientras que la absorción tenderá a aumentar a medida que aumenta el número de repeticiones. Diversos estudios (Huda et al., 2014; Kunieda et al., 2014; Abreu et al., 2018) muestran que estas propiedades, por lo general, presentan un comportamiento asintótico con el número de ciclos de reciclaje, lo cual quiere decir, que llegados a cierto punto alcanzan una estabilidad.

Respecto al efecto de la adición de fibra sobre la absorción de agua, muestra una disminución al aumentar el contenido de fibra, presentando valores inferiores en los áridos con fibra respecto a los áridos sin fibra de un mismo ciclo. Tal es el caso de 6-6-RCA con una absorción de 8,45% y 8,02% (4/12mm y 12/20mm, respectivamente) frente a 0-0-RCA con valores de 9,52% y 9,02% (4/12mm y 12/20mm, respectivamente). Esto significa que el mortero adherido alrededor del árido grueso original disminuyó al aumentar el contenido de fibra, debido a que las fibras pueden fortalecer solo la parte de mortero de FRC, no la interfaz (interfacial transition zone, ITZ) entre el mortero y el árido grueso, esto permite que durante el triturado la fractura se produzca en ITZ, es decir, disminuyendo la cantidad mortero adherido en el árido (Kunieda et al., 2014).

Se puede concluir que la densidad y la absorción son propiedades interrelacionadas que están muy influenciadas por la cantidad de mortero adherido. La calidad del árido grueso se degrada con el número de repeticiones y esto pueden influir en las propiedades mecánicas y de durabilidad de diferentes generaciones de hormigón de árido grueso reciclado. Además, las fibras al ayudar a inducir la fractura en ITZ, podrían ser útil para reproducir un árido reciclado de alta calidad con menos mortero.

4.2. Contenido de fibras y detección de microplásticos

La determinación del contenido de fibras y la detección de microplásticos en el árido se ha realizado mediante métodos alternativos como se ha explicado en el apartado de metodologías de ensayo. Estos ensayos se presentan como prueba piloto para la valoración a los métodos encontrados en la literatura.

4.2.1. Contenido de fibras

En el caso del RCA procedente de hormigón reforzado con fibras, la presencia de fibras se encuentra en el mortero, como se muestra en la Figura 28. Esto indica que las fibras pueden fortalecer solo la parte de mortero de FRC, no la interfaz entre el mortero y el árido grueso (ITZ), lo cual facilita que se produzca la rotura en la ITZ durante el proceso de trituración (Kunieda et al., 2014).

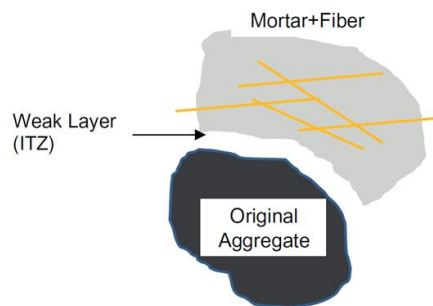


Figura 28. Mecanismo de remoción de mortero. Fuente: Kunieda et al., 2014

Siguiendo la línea de lo antes expuesto, en la Figura 29, se describe que los RCA contienen tanto fibras incrustadas, que han permanecido encapsuladas en el mortero que se encuentra en la superficie del árido, como fibras libres, que se han separado del árido mediante la rotura de la capa de mortero. En este sentido, podemos afirmar que cuanto menor sea el tamaño de partículas de RCA, mayor será la cantidad de fibras libres. Otro elemento presente son los microplásticos, estos son pequeñas partículas de fibras que se desprenden durante el proceso de trituración, debido a que las fibras utilizadas son poliméricas.

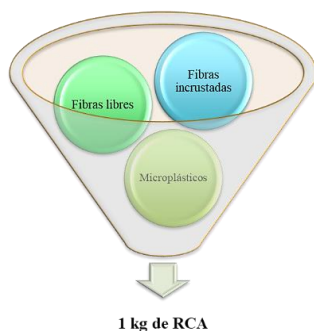


Figura 29. Componentes adicionales en los RCA procedentes de FRC. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 19 se presenta los resultados obtenidos de las pruebas de determinación del contenido de fibras. Es importante remarcar que los resultados obtenidos de contenido de fibras en los RCA no se han considerado dentro de la dosificación de los hormigones fabricados. En todos los casos se ha procedido a incorporar la dosificación indicada de fibras (como fibras nuevas) sin considerar el reemplazo de estas por fibras recicladas, ni realizar una compensación en base al contenido ya presente en el árido.

Tabla 19. Resultados cuantificación contenido de fibras libres e incrustadas

	Fibras libres					Fibras incrustadas					
	Técnica					Técnica					
	Flotación		Separación manual			Conteo manual			Quema/Incineración		
			4/12	12/20	Tasa	4/12	12/20	Tasa	4/12	12/20	Tasa
kg/kg	Tasa	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg		kg/kg		
6-RCA	0,0011	45%	-	-	-	-	-	-	0,0046	0,0026	287%
0-6-RCA	0,0016	63%	0,0010	0,0002	45%	0,0002	0,0005	28%	0,0060	0,0031	361%
6-0-RCA	0,0005	20%	0,0005	0,0001	22%	0,0002	0,0006	33%	0,0053	0,0038	366%
6-6-RCA	0,0026	103%	0,0016	0,0002	72%	0,0004	0,0010	58%	0,0062	0,0030	366%
- La dosificación de fibra ha sido de 6 kg/m ³ que equivalen a 0,0025 kg/kg - Valores expresados en kg/kg de RCA - Tasa: % de recuperación en referencia a la dosificación de fibras											

Los resultados obtenidos por la técnica de flotación, en la que se realiza un proceso de lavado del RCA previo a la separación de las fracciones, obtuvo una tasa de recuperación del 45% para 6-RCA en el primer ciclo de reciclaje. La fluctuación de los valores de tasa de recuperación entre los distintos RCA hace referencia a lo antes expuesto sobre la acción del mortero en el encapsulamiento de las fibras. Tal es el caso de 0-6-RCA y 6-0-RCA, ambos son áridos del segundo ciclo de reciclaje con incorporación de fibras en una sola generación. Sin embargo, la tasa de recuperación de 6-0-RCA es del 20%, 3 veces menor que 0-6-RCA con una tasa del 63%, lo cual sugiere que las fibras en 6-0-RCA están protegidas por una segunda capa de mortero en la superficie, esto provoca que durante la trituration del hormigón se desprenda menor cantidad de fibras, quedando estas adheridas a la superficie del árido. Caso contrario ocurre con 6-6-RCA, en este se obtuvo una tasa del 103%. Hay que tomar en cuenta que este árido posee fibras en sus 2 generaciones anteriores y que el tamaño de partículas, en su mayoría (aprox. un 75%), es < 12 mm. Como ya sabemos, cuanto menor sea el tamaño de partículas de RCA, mayor será la cantidad de fibras libres, tal y como se observa en la Figura 30.

Es importante remarcar que para 6-0-RCA y 6-6-RCA, este porcentaje de recuperación de fibras, hace referencia a una dosificación teórica de fibras, puesto que se desconoce a ciencia cierta la cuantía de fibras introducidas a través del árido, ya que ambos proceden del reciclaje de 6-RCA.

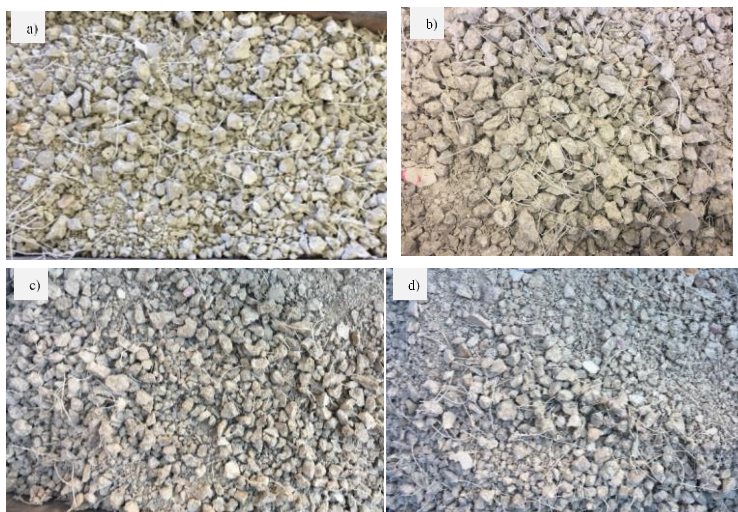


Figura 30. Observación de fibras en RCA: a) 6-RCA, b) 0-6-RCA, c) 6-0-RCA, d) 6-6-RCA

El proceso de cuantificación de fibras por separación manual se realizó en el árido ya tamizado y sin lavar. De esta forma obtenemos el porcentaje de fibras libres que ha quedado en cada fracción, a manera de contrarrestar estos resultados con los de la técnica anterior. Para el árido del primer ciclo (6-RCA) no se ha realizado dicha prueba, debido que esta técnica se introdujo en la campaña experimental posteriormente y en su momento no se disponía de una muestra de 6-RCA para su realización. Dicho esto, nos centraremos en observar las diferencias entre los RCA del segundo ciclo. Las tasas de recuperación para cada tipo de RCA muestran que, una vez tamizado el material, el porcentaje de fibras libres que permanece en el árido es consistente con la prueba de flotación y que estas fibras se encuentran en mayor proporción en la fracción 4/12. Tal es el caso de 0-6-RCA y 6-6-RCA que obtuvieron valores de 45% y 72%, respectivamente, referidos a la dosificación de fibras. Estos valores representan el 70%, referido al total recuperado por flotación. En cuanto a 6-0-RCA, se confirma lo antes vistos sobre el bajo contenido de fibras libres.

Respecto a las técnicas de cuantificación de fibras incrustadas, se ha optado por el conteo manual, ya que la técnica de incineración ha arrojados valores poco representativos, los cuales se pueden atribuir a errores cometidos en la realización de la prueba, a la poca literatura disponible al respecto y por tanto a la inexistencia de puntos de referencia que permitieran un ajuste correcto del método.

Fijándonos en el contenido de fibras incrustadas, en concreto para 0-6-RCA, el resultado ha sido satisfactorio. En la prueba de flotación, 0-6-RCA presentó una tasa de recuperación del 63% de la dosificación como fibras libres, lo cual sugiere que el 37% restante se debía encontrar como fibras incrustadas en el conjunto de las fracciones 4/12 y 12/20, en mayor medida en la fracción 12/20. Se ha obtenido un resultado del 28% como fibras incrustadas, esto sugiere que el 9% restante se encuentra en la fracción >20 mm. Misma tendencia se observa para 6-6-RCA, donde la tasa de fibras incrustadas es del 58%, lo cual se corresponde con un árido que ha tenido incorporación de fibras en 2 generaciones.

4.2.2. Detección de microplásticos

La detección de microplásticos se realizó, como prueba piloto, sobre una muestra de 6-RCA, en la que se filtró el agua utilizada en la técnica de flotación para la recuperación de fibras libres. Tal y como se describe en el apartado de metodologías de ensayo, se ha de filtrar el agua de dicha muestra a través de los tamices de 5 y 0,125 mm; la muestra para la detección de microplásticos es la retenida en el tamiz de 0,125 mm. Dicha muestra pasó por dos procesos de secado, primero a 100° C para eliminar la humedad de la muestra y posteriormente a 220° C para “quemar” los microplásticos. Finalmente, el peso de los microplásticos se ha asumido como la diferencia en masa entre las dos muestras secas. En la Tabla 20 se presentan los resultados obtenidos, arrojando una “concentración” de microplásticos de 0,221 gr/kg de árido 6-RCA.

Tabla 20. Resultados ensayo detección de microplásticos

		Cuantía microplásticos	
6-RCA	Peso de la muestra de árido	5,42	kg
	Peso antes de horno	12,30	gr
	Peso seco a 100° C	2,80	gr
	Peso seco a 220° C	1,60	gr
	Peso aprox. microplásticos	1,20	gr
	Concentración microplásticos	0,221	gr/kg



Figura 31. Etapas del ensayo de detección de microplásticos

La validación del método no ha sido satisfactoria, quedaba claro que se habían quemado más “cosas” que solo las fibras. Al revisar la literatura, se ha encontrado que las variaciones entre los grupos de investigación se encuentran en todos los pasos del muestreo. Por ejemplo, no existe un tamaño estándar de red, poro o malla que lleve a muestrear diferentes tamaños de microplásticos en cada estudio. La representatividad y reproducibilidad de la mayoría de los resultados es incierta, amplificada por descripciones metodológicas descuidadas que carecen de detalles importantes, como el volumen de la muestra global. Por tanto, existe una necesidad urgente de una metodología validada, rápida y sencilla (Correia Prata *et al.*, 2019).

Por tanto, de esta prueba piloto podemos concluir que;

- De acuerdo a la técnica de flotación, la tasa de recuperación de fibras libres es de aproximadamente el 50% de la dosificación total de fibras y que este porcentaje puede disminuir a medida que aumenta el mortero adherido en la superficie de las fibras.
- De acuerdo a la separación manual, el 70% de las fibras libres se encuentran distribuidas en las fracciones 4/12 y 12/20, especialmente en la fracción 4/12.

- De acuerdo al conteo manual, la tasa de recuperación de fibras incrustadas en el conjunto de las fracciones 4/12 y 12/20 es de aproximadamente el 30% de la dosificación total de fibras, presentes en mayor medida en la fracción 12/20.
- La técnica de incineración necesita ser estudiada más a fondo, a fin de establecer los parámetros específicos y puntos de referencia para la obtención de resultados más representativos o bien desarrollar otros posibles métodos más efectivos para la cuantificación de fibras.
- Respecto a los microplásticos, existe la necesidad de establecer nuevas metodologías más eficientes y confiables.

4.3. Caracterización del hormigón

4.3.1. Consistencia en estado fresco

La realización de este ensayo se ha llevado a cabo en todas las amasadas realizadas. Al terminar el proceso de amasado se rellenaba el cono previamente preparado junto al lugar de amasado. Si la consistencia se encontraba dentro del rango establecido se procedía a rellenar los moldes de las probetas a ensayar, de lo contrario, se debía continuar amasando hasta conseguir una consistencia adecuada mediante el aumento de aditivo si procedía. Cabe destacar que las amasadas con mayor contenido de fibras fue necesario este hecho, ya que los resultados de consistencia obtenidos no entraban dentro de unos márgenes de aceptación establecidos previamente. La Tabla 21 muestra los resultados de consistencia obtenidos en todas las amasadas realizadas durante este estudio.

Tabla 21. Valores de consistencia obtenidos en las amasadas realizadas por cono de Abrams

Tipo mezcla	Fecha	Amasadas		Aditivo Plastificante (%)	Cono _{prom} (cm)
		No.	Volumen (L)		
0-NAC	30/03/2021	4	30,00	0,24	12,00
6-NAC	06/04/2021	4	30,00	0,80	11,50
0-RAC-0	10/05/2021	3	27,00	-	20,50
0-RAC-6	10/05/2021	3	27,00	0,40	18,50
6-RAC-0	12/05/2021	2	24,00	0,45	15,00
6-RAC-6	12/05/2021	2	24,00	1,00	8,00
0-0-RAC-0	28/06/2021	1	33,00	-	22,00
0-0-RAC-6	28/06/2021	1	33,00	-	19,00
0-6-RAC-0	29/06/2021	1	33,00	-	20,00
0-6-RAC-6	02/07/2021	1	33,00	-	10,00
6-0-RAC-0	29/06/2021	1	25,00	-	15,50
6-0-RAC-6	02/07/2021	1	25,00	-	12,00
6-6-RAC-0	30/06/2021	1	21,00	-	13,00
6-6-RAC-6	30/06/2021	1	21,00	0,40	1,00

Si bien es sabido que tanto los hormigones con árido reciclado, como los hormigones con fibra conlleva el empleo de aditivos para obtener consistencias trabajables; estos valores muestran que existe mayor relación entre el contenido de fibra y la trabajabilidad. Dado que los valores más

altos de cono han sido obtenidos para los hormigones que no contienen fibra en ninguna de las 3 generaciones, incluso sin añadir aditivo a la mezcla.

Un hecho destacable es el caso de las amasadas correspondiente a 6-RAC-6 en la que se alcanzó la dosificación máxima recomendada de aditivo de 1% sin que se produjera variación considerable en el resultado de la prueba (Figura 32). De igual forma para la amasada de 6-6-RAC-6 donde la pérdida de trabajabilidad fue excesiva, obteniéndose un resultado de cono de Abrams de 1,0 cm, a pesar de este resultado la consistencia de la mezcla era bastante líquida. En estos casos se destaca la relación del contenido elevado de fibras en la mezcla que realiza una acción de “cosido” entre las partículas de árido produciendo un efecto de segregación entre las partículas de árido y la pasta de cemento.



Figura 32. Mezcla 6-RAC-6: a) Aspecto de mezcla, b) Prueba cono de Abrams

4.3.2. Caracterización en estado endurecido

Tal como se indicó en el plan de ensayos de propiedades mecánicas en probetas (Tabla 10), en la III Generación de hormigón fue necesario cambiar el tamaño de probetas para los ensayos. Esto debido a las cuantías disponibles de árido RCA-II obtenidas en el segundo ciclo de reciclaje que limitó el volumen máximo de mezcla permitido para mantener una sustitución del 100% del árido grueso.

Por tanto, fue necesario realizar ajustes de homogenización de resultados a fin de poder comparar los valores obtenidos del análisis de las propiedades mecánicas en probetas de tamaño distinto. Para esto se realizaron pruebas en la II Generación, donde se determinó la resistencia a la compresión a 7 y 28 días en probetas de 150x300 mm y 100x200 mm con el objetivo de analizar la diferenciación de los resultados en función del tamaño de probetas y obtener un factor de corrección. Se obtuvo como resultado una relación entre 0,88 y 0,92 para las probetas de 100x200 mm en función de las probetas de 150x300 mm.

En ese sentido, Pérez Sánchez (1998) establece en su estudio que un incremento positivo o negativo del diámetro del espécimen se traduce en una modificación proporcional de su volumen y, por tanto, de su resistencia a compresión. Recomienda un “Factor de Corrección F4”, para especímenes de esbeltez 2 ($E = 2$) y distinto diámetro, referidos al tamaño normalizado de probeta de 150x300 mm como se muestra en la Figura 33.

DIMENSIONES DEL ESPÉCIMEN (cm)	LÍMITES DE VARIACIÓN DE F4	VALOR MEDIO DE F4
10 x 20	0,94 a 1,00	0,97
15 x 30	-----	1,00
20 x 40	No se indican	1,03
25 x 50	1,00 a 1,10	1,05
30 x 60	No se indican	1,10

Figura 33. Factor de Corrección F4. Fuente: Pérez Sánchez, M. (1998)

4.3.2.1. Resistencia a la compresión

Siguiendo lo descrito anteriormente, y contrastando, tanto los resultados obtenidos en la prueba realizada, como los recomendados por Pérez Sánchez, se ha optado por utilizar un factor de corrección de 0,90 aplicado a los valores de resistencia a la compresión de las probetas de 100x200 mm, con el fin de obtener los resultados normalizados siguiendo la expresión:

$$f_{cm,150eq} = \frac{f_{cm,100}}{0,90}$$

En la Tabla 22 se muestran los resultados, tanto medidos, como los normalizados, obtenidos a 7 y 28 días para cada tipo de hormigón. En la Figura 34 se representan dichos resultados como grafico de barras en el que se observa una clara tendencia decreciente a medida que aumentan los ciclos de reciclaje. Aunque, se presenta un ligero aumento en los hormigones fabricados con RCA-II que contienen fibras desde la primera generación.

Tabla 22. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 y 28 días

	$f_{cm, 150}$ (MPa)	CoV	$f_{cm, 100}$ (MPa)	CoV	$f_{cm, 150eq}$ (MPa)	$f_{cm, 150}$ (MPa)	CoV	$f_{cm, 100}$ (MPa)	CoV	$f_{cm, 150eq}$ (MPa)
	7 días					28 días				
0-NAC	33,60	5,8%	-	-		40,20	1,3%	-	-	
6-NAC	34,10	1,5%	-	-		40,00	5,8%	-	-	
0-RAC-0	26,90	4,5%	23,10	4,6%		31,60	5,1%	25,90	9,0%	
0-RAC-6	23,70	4,1%	21,80	1,9%		29,60	2,9%	26,00	4,0%	
6-RAC-0	-	-	23,80	12,0%	26,44	-	-	25,00	10,1%	27,78
6-RAC-6	-	-	24,00	1,6%	26,67	-	-	24,60	3,0%	27,33
0-0-RAC-0	-	-	17,70	5,6%	19,67	-	-	22,30	1,7%	24,78
0-0-RAC-6	-	-	16,40	1,6%	18,22	-	-	20,00	6,5%	22,22
0-6-RAC-0	-	-	15,40	18,3%	17,11	-	-	20,50	5,8%	22,78
0-6-RAC-6	-	-	16,90	3,5%	18,78	-	-	19,70	3,7%	21,89
6-0-RAC-0	-	-	-	-	-	-	-	23,20	1,0%	25,78
6-0-RAC-6	-	-	-	-	-	-	-	23,40	1,7%	26,00
6-6-RAC-0	-	-	-	-	-	-	-	24,60	0,8%	27,33
6-6-RAC-6	-	-	-	-	-	-	-	22,80	6,6%	25,33

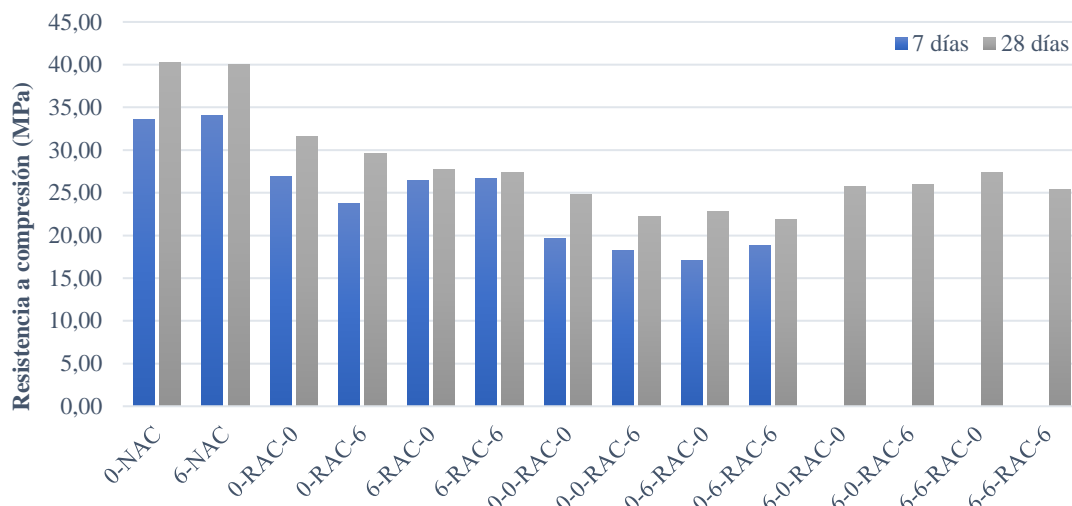


Figura 34. Gráfico resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 y 28 días

Los resultados a 7 días de la primera generación fueron satisfactorios, alcanzando los 33,60 MPa para 0-NAC y 34,10 MPa para 6-NAC, siendo un 96% de la resistencia de diseño de 35,00 MPa a 28 días. Respectos a los hormigones de segunda y tercera generación, presentan pérdida de resistencia como se esperaba, como caídas del 23% y 27%, respectivamente, en relación a la generación anterior. Como se describió en apartados anteriores, en la tercera generación no fue posible realizar ensayos de resistencia a compresión a 7 días en todos los hormigones. Esto debido a la poca cuantía disponible de árido 6-0-RCA y 6-6-RCA que limitaron del volumen de mezcla máximo que se podía fabricar.

Respecto a la resistencia a la compresión a 28 días, se presenta la misma tendencia decreciente observada a los 7 días. El hormigón de primera generación, fabricado con árido grueso natural, alcanzó valores de 40,20 MPa y 40,00 MPa para 0-NAC y 6-NAC, respectivamente, siendo un 14,5% mayor que la resistencia de diseño de 35,00 MPa. Para el caso de la resistencia a la compresión de los hormigones de la segunda generación, se presenta una caída del 25-30% respecto a los hormigones de la generación anterior. Esta misma tendencia se observa para la tercera generación, con una caída del 25% respecto a la segunda y 40% respecto a la primera.

Sin embargo, en los hormigones de la tercera generación, fabricados con árido que contiene fibra desde la primera generación (6-0-RAC-0, 6-0-RCA-6, 6-6-RAC-0 y 6-6-RAC-6), la caída en la resistencia es de 5%, respecto a la generación anterior correspondiente a cada uno, y del 35% respecto a la primera generación (6-NAC). Este cambio de tendencia se debe, principalmente, a las características propias del árido 6-0-RCA y 6-6-RCA, utilizados en estos hormigones, los cuales presentan una densidad ligeramente mayor y menor absorción que 0-0-RCA y 0-6-RCA pertenecientes al mismo ciclo. Tanto en la primera, como en la segunda generación, los hormigones con fibra presentaban una resistencia a la compresión ligeramente menor respecto a los que no contienen fibra. Lo cual sugiere que la mejora de la resistencia de estos hormigones no está relacionado al contenido de fibras que poseen. En general, se puede ver como en todas las generaciones, para el mismo árido, la incorporación de fibras nuevas siempre hacía bajar un poco la resistencia.

Cabe destacar que se esperaban estos resultados de caída de la resistencia, debido a la alta absorción de los áridos y, por ende, a la necesidad de incorporar agua adicional con relaciones a_{total}/c altas. Es probable que con un aumento de la cuantía de cemento y reducción de agua habríamos podido alcanzar las mismas resistencias. Sin embargo, se optó por mantener una “metodología” consistente a lo largo de la campaña experimental, fijando los parámetros de dosificación y ver qué pasaba.

A pesar de las pérdidas de resistencia a medida que aumenta el número de ciclos de reciclaje, todos los hormigones alcanzaron valores de resistencia a la compresión por encima de 20 MPa.

4.3.2.2. Resistencia a la tracción

Tal y como se describe en el plan de ensayos, el ensayo de resistencia a la tracción indirecta se ha medido sobre probetas utilizadas para determinar el módulo de elasticidad, por lo cual se ha determinado principalmente a los 28 días, salvo el caso de los hormigones de la primera generación. Dada esta limitación, no fue posible realizar el ensayo en los hormigones 6-6-RAC-0 y 6-6-RAC-6, esto debido a que no se disponían de probetas suficientes y se dio prioridad a la realización de los ensayos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad. En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos de la realización de este ensayo siguiendo la norma UNE-EN 12390-6: 2010.

Tabla 23. Resultados del ensayo de resistencia a tracción a 7 y 28 días

	$f_{ctm, 150}$ (MPa)	CoV	$f_{ctm, 150}$ (MPa)	$f_{ctm, 100}$ (MPa)	CoV
	7 días		28 días		
0-NAC	2,73	9%	2,93	-	3,8%
6-NAC	2,41	3%	3,30	-	3,9%
0-RAC-0	-	-	2,86	-	11,4%
0-RAC-6	-	-	2,53	-	23,7%
6-RAC-0	-	-	2,68	-	10,7%
6-RAC-6	-	-	2,58	-	16,0%
0-0-RAC-0	-	-	-	1,75	18,7%
0-0-RAC-6	-	-	-	2,53	6,9%
0-6-RAC-0	-	-	-	2,19	5,6%
0-6-RAC-6	-	-	-	2,47	2,8%
6-0-RAC-0	-	-	-	2,35	9,8%
6-0-RAC-6	-	-	-	2,58	6,8%
6-6-RAC-0	-	-	-	-	-
6-6-RAC-6	-	-	-	-	-

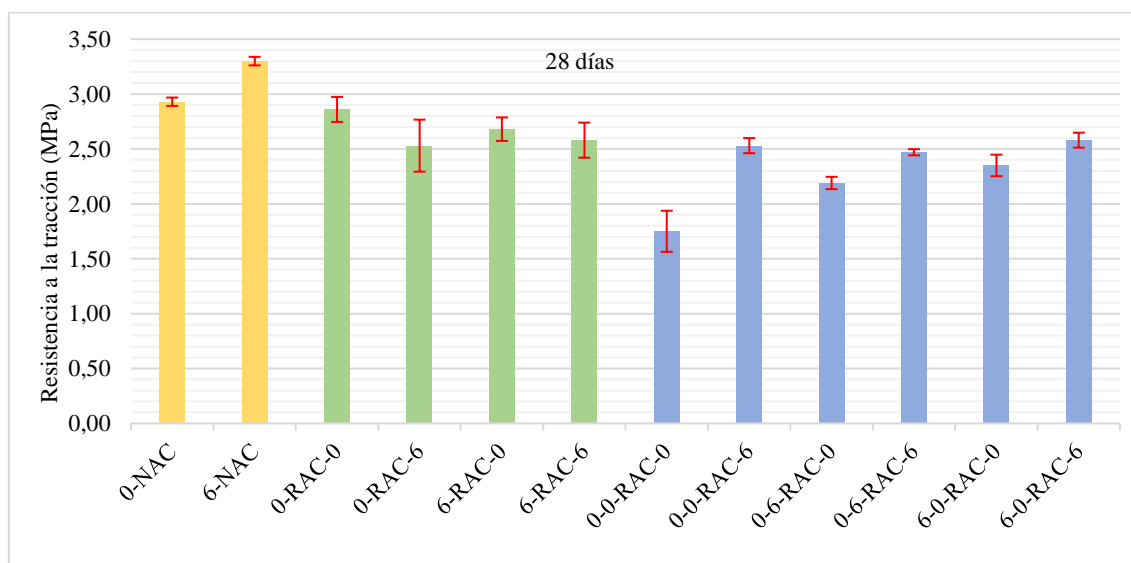


Figura 35. Gráfico resultados del ensayo de resistencia a tracción "Brasileño" a 28 días

De acuerdo a los resultados obtenidos y representados en la Figura 35, se distingue una relación entre la resistencia a la tracción y el contenido de fibras, acentuándose más esta diferencia en los hormigones de la tercera generación. Además, en comparación con la resistencia a compresión, se observa que la caída de la resistencia a compresión no se traslada directamente a la resistencia a tracción entre las generaciones.

En la primera generación, 6-NAC, con un valor de resistencia de 3,30 MPa, es un 13% mayor que 0-NAC que obtuvo una resistencia de 2,93 MPa. Por el contrario, en la segunda generación el resultado más alto, de 2,86 MPa, ha sido 0-RAC-0, que no contiene fibra. En la tercera generación, los resultados demuestran que a medida que aumenta el contenido de fibras, mayor es la resistencia a la tracción en comparación con los hormigones de su misma generación fabricados con el mismo árido. Tal es el caso de 6-0-RAC-0 que obtuvo un resultado de 2,35 MPa, mientras que 6-0-RAC-6 fue de 2,58 MPa, esto representa un aumento del 10%. El aumento más significativo se encuentra entre 0-0-RAC-0 y 0-0-RAC-6, con valores de 1,75 MPa y 2,53 MPa, respectivamente, lo cual representa un aumento de la resistencia a la tracción del 45%. Este comportamiento confirma que la resistencia a la tracción se ve más influenciada por el contenido de fibras que por las características propias del árido.

Con relación a la fractura a tracción, se puede apreciar un cambio en el modo de fallo cuando se agregan fibras. En Figura 36 se muestra como las fibras se encargan de sujetar las caras de la fisura cuando se produce la rotura.



Figura 36. Aspecto de probeta 6-NAC sometida a ensayo de tracción indirecta separada manualmente

4.3.2.3. Módulo de elasticidad

La determinación del módulo de elasticidad se realizó en 3 probetas de cada tipo de hormigón a 7, repitiendo el ensayo sobre la misma probeta a los 28 días, es decir, a los 7 días de curado, se procedió a realizar el ensayo; una vez terminado, se llevaron nuevamente las probetas a la cámara humedad hasta alcanzar la edad de 28 días. Llegando a esta edad se volvió a repetir el ensayo.

Como se describe en el apartado de metodología de ensayos, la determinación del módulo de elasticidad se realiza aplicando sobre la probeta 3 ciclos de carga a compresión. Por normativa, para fines de cálculo se seleccionan los valores el tercer ciclo, dado que este es el más representativo. En la Tabla 24 se presentan los resultados del ensayo a 7 y 28 días.

Tabla 24. Resultados del ensayo de módulo de elasticidad a 7 y 28 días

	$E_{m, 150}$	$E_{m, 100}$	CoV	$E_{m, 150}$	$E_{m, 100}$	CoV
	(GPa)	(GPa)		(GPa)	(GPa)	
	7 días			28 días		
0-NAC	29,81	-	3,6%	34,79	-	9,8%
6-NAC	29,10	-	7,9%	32,50	-	2,6%
0-RAC-0	23,46	-	2,4%	25,17	-	1,4%
0-RAC-6	22,41	-	2,2%	24,22	-	6,4%
6-RAC-0	23,93	-	3,5%	26,84	-	8,8%
6-RAC-6	22,92	-	2,9%	24,27	-	1,3%
0-0-RAC-0	-	23,77	1,7%	-	25,44	3,5%
0-0-RAC-6	-	23,78	2,3%	-	24,20	8,0%
0-6-RAC-0	-	24,10	1,3%	-	24,93	0,7%
0-6-RAC-6	-	23,56	3,5%	-	22,40	1,2%
6-0-RAC-0	-	-	-	-	27,31	1,9%
6-0-RAC-6	-	-	-	-	25,14	5,8%
6-6-RAC-0	-	-	-	-	27,65	0,8%
6-6-RAC-6	-	-	-	-	25,65	3,0%

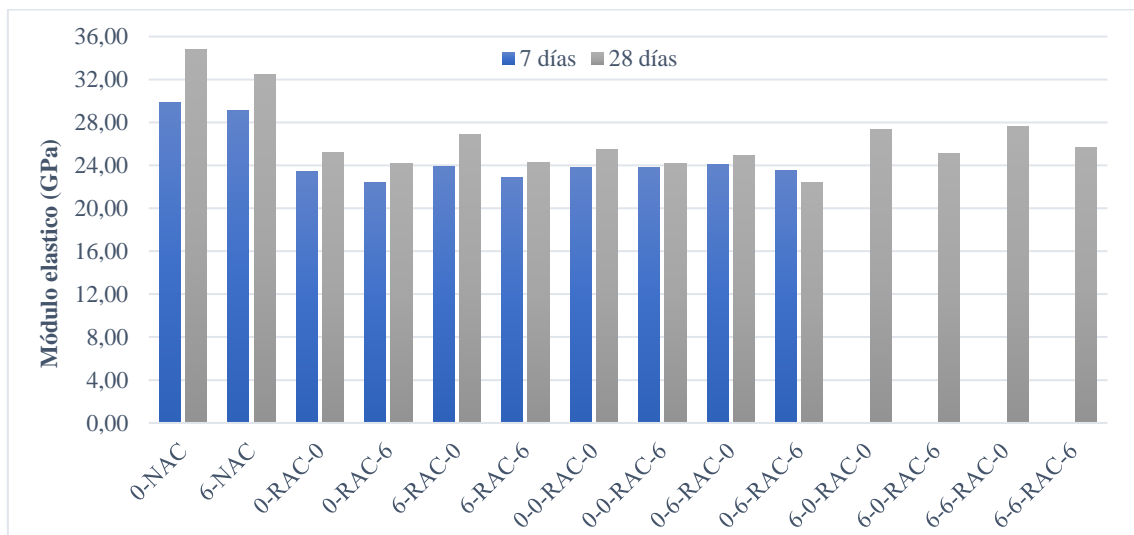


Figura 37. Gráfico resultados del ensayo de módulo de elasticidad a 7 y 28 días

Los resultados obtenidos, tanto a 7 días, como a 28 días, muestran comportamiento similar a los resultados de la resistencia a la compresión. De igual forma, no se realizaron ensayos a 7 días en los hormigones 6-0-RAC-0, 6-0-RCA-6, 6-6-RAC-0 y 6-6-RAC-6, debido que no se disponían de probetas suficientes.

Los valores de módulo de elasticidad para 0-NAC han sido de 29,81 GPa y 34,79 GPa, a 7 y 28 día, respectivamente; y para 6-NAC de 29,10 GPa y 32,50 GPa, siendo estos ligeramente menor que el hormigón sin fibra. En esta primera generación, el incremento entre los días 7 y 28 ha sido del 14% para 0-NAC y del 10% para 6-NAC. Sin embargo, en la Figura 37 se observa que, a partir de la segunda generación, no existe diferencia significativa entre los valores obtenidos a 7, comprendidos entre 22,41 GPa y 24,10 GPa; y los valores a 28 días, comprendidos entre 22,40 GPa y 26,84 GPa, siendo esto un incremento inferior al 5% prácticamente en todos los casos.

Se encontró que el módulo de los hormigones de la segunda generación son en promedio un 25% más bajos que los de la primera. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por otros autores, que indican que la disminución del módulo de elasticidad es mayor que la sufrida por la resistencia a compresión. Como resumen se establece que la caída varía entre un 20-30% para hormigones con sustituciones de árido reciclado al 100%. (ACHE, 2006) (Gómez, Vázquez and Agulló, 2001a, 2001b).

Cabe mencionar que a partir de la segunda generación existe una cierta estabilidad entre los hormigones de la segunda generación, fabricados con 0-RCA y 6-RCA, y los de la tercera generación, fabricados con 0-0-RCA y 0-6-RCA, siendo estos un 2% menor que los anteriores. Sin embargo, al igual que en la resistencia a la compresión, los hormigones 6-0-RAC-0, 6-0-RCA-6, 6-6-RAC-0 y 6-6-RAC-6 cambian la tendencia, presentando valores, comprendidos entre 25,14 GPa y 27,65 GPa, ligeramente superiores que los anteriores.

Podemos concluir que la pérdida del módulo de elasticidad, después de tres ciclos de reciclaje, no supera el 35%. Estos resultados son muy lógicos debido a que el árido reciclado con más mortero es más “débil” y se deforma más bajo compresión. Además, no se encontró diferencias significativas entre los hormigones con y sin fibra. El módulo de elasticidad es una de las propiedades del hormigón que no se ve directamente influenciada por el contenido de fibras.

4.3.2.4. Ensayo Barcelona

Para la realización del ensayo Barcelona se utilizaron 6 probetas de Ø150/150 mm para cada tipo de hormigón, salvo el caso de los hormigones fabricados con 6-0-RCA y 6-6-RCA en los que se utilizaron 5 probetas de Ø150/150 mm. A pesar de que el ensayo Barcelona se aplica a hormigones reforzados con fibras, en este estudio se realizó la prueba sobre todos los hormigones. Sin embargo, para fines gráficos se han utilizado los hormigones con fibras. En la Tabla 25 se muestran los resultados como el valor medio de la resistencia residual para desplazamientos verticales de 0,5; 1,5; 2,5 y 3,5 mm ($f_{0.5}$, $f_{1.5}$, $f_{2.5}$ y $f_{3.5}$, respectivamente), juntamente con el coeficiente de variación de cada parámetro.

Tabla 25. Resultados ensayo Barcelona

	f_{ct} (MPa)	CoV (%)	$f_{0.5}$ (MPa)	CoV (%)	$f_{1.5}$ (MPa)	CoV (%)	$f_{2.5}$ (MPa)	CoV (%)	$f_{3.5}$ (MPa)	CoV (%)
0-NAC	2,50	5,82	-	-	-	-	-	-	-	-
6-NAC	2,99	3,76	1,22	8,28	0,99	10,34	0,88	11,09	0,79	11,36
0-RAC-0	2,20	4,33	-	-	-	-	-	-	-	-
0-RAC-6	2,19	2,79	0,90	18,10	0,67	19,57	0,57	20,92	0,50	23,72
6-RAC-0	2,35	8,43	0,56	19,44	0,40	17,52	0,32	7,49	0,29	4,88
6-RAC-6	2,28	6,87	1,16	16,93	0,91	19,55	0,79	20,77	0,72	21,70
0-0-RAC-0	1,88	1,97	-	-	-	-	-	-	-	-
0-0-RAC-6	1,90	2,92	0,82	11,71	0,63	15,95	0,53	17,46	0,47	19,09
0-6-RAC-0	1,79	2,17	0,49	4,78	0,30	13,79	0,25	17,09	0,22	16,90
0-6-RAC-6	1,82	2,36	0,97	5,94	0,79	11,48	0,68	13,61	0,63	14,42
6-0-RAC-0	1,90	2,39	0,27	32,43	0,17	21,28	0,12	3,72	0,10	32,01
6-0-RAC-6	1,99	3,27	0,94	6,12	0,76	8,82	0,66	10,65	0,60	12,90
6-6-RAC-0	1,98	2,90	0,72	13,79	0,53	11,74	0,46	14,87	0,41	18,33
6-6-RAC-6	1,95	6,99	1,19	12,10	1,09	13,42	0,98	10,62	0,90	11,65

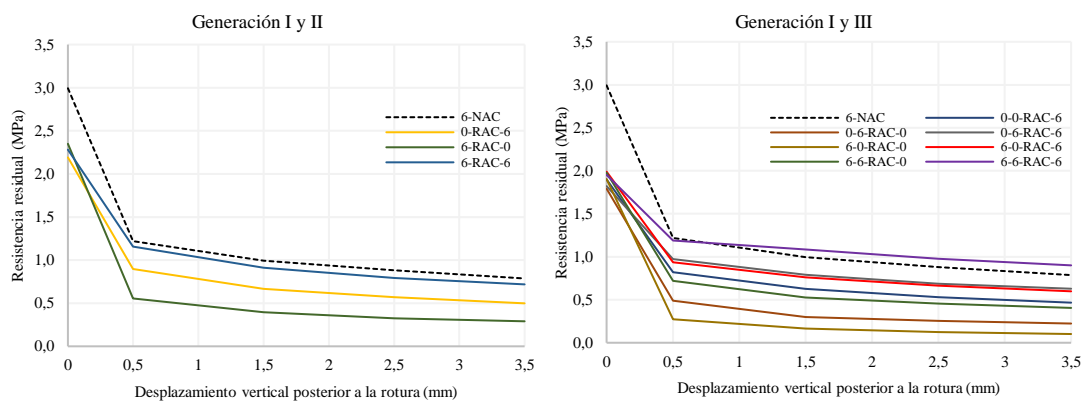


Figura 38. Resistencia residual después de la rotura mediante ensayo Barcelona. Comparativa Generación I, II y III

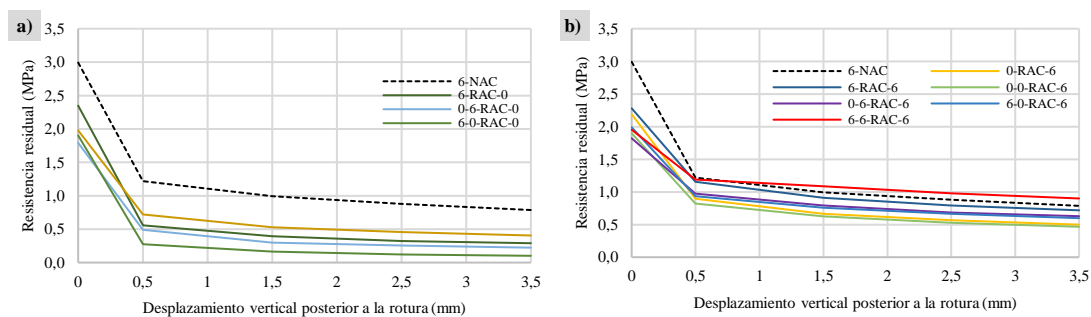


Figura 39. Resistencia residual después de la rotura: a) hormigones sin fibra en su última generación, b) hormigones con fibra en su última generación

El análisis de la Figura 38 permite apreciar el comportamiento de los hormigones en sus diferentes generaciones, comparándolas con la primera generación fabricada con árido natural. En la comparativa entre la generación I y II, podemos ver como 6-NAC alcanza una resistencia de 2,99 MPa al momento de la fisura, mayor que los hormigones con árido reciclado que alcanzan una resistencia muy similar entre sí, con valores comprendidos entre 2,19 MPa y 2,35 MPa. Sin embargo, las diferencias se acentúan en la resistencia residual posterior a la fisuración, donde se observa cómo influye el contenido de fibras, debido a que éstas empiezan a actuar luego de que se produce la fisura. De los hormigones con árido reciclado, la mayor resistencia residual se encuentra en 6-RAC-6, con valores muy similares a 6-NAC. Además, se observa como decae la resistencia a medida que disminuye el contenido de fibras, siendo la menor de todas 6-RAC-0.

En la comparativa entre la generación I y III, podemos observar un comportamiento similar a lo anteriormente descrito, en como las máximas resistencias son alcanzadas por los hormigones con mayor contenido de fibras. Hay que destacar como 6-6-RAC-6 alcanza una resistencia residual incluso mayor a 6-NAC, a pesar de ser este un hormigón de tercera generación.

En la Figura 39.a, en la que se comparan hormigones sin incorporación de fibras en su última generación, se puede observar una diferencia más acentuada respecto a 6-NAC, con caídas más marcadas, tanto en la resistencia al momento de la fisura, como en la resistencia residual. Sin embargo, en estos hormigones existe una resistencia residual debido a la presencia de fibras incorporadas a través de RCA. En la Figura 39.b, los hormigones con fibra en su última generación, nuevamente presentan un mejor comportamiento con resistencias residuales muy similares entre sí, sin que se vean afectados por la calidad de la matriz.

Por tanto, en base a los resultados obtenidos, podemos concluir que;

- La resistencia residual está estrechamente relacionada al contenido de fibras presente en el hormigón y está no se ve especialmente afectada por la calidad de la matriz del mismo.
- Se distingue que, aunque la matriz de RAC es peor que los NAC, a medida que aumentan los ciclos de reciclaje, la reducción de la resistencia residual de estos es menor, llegando incluso a superar a 6-NAC.
- Existe una resistencia residual, incluso en los hormigones sin incorporación nueva de fibras, debido a la presencia de fibras incorporadas a través del árido. Esto sugiere la existencia de un refuerzo “colateral” con la incorporación de áridos con fibras.
- En futuras investigaciones, podría considerarse la capacidad de resistencia residual en el hormigón, con incorporación de RCA con fibras, para realizar ajustes en las dosificaciones, a fin de disminuir la incorporación de fibras nuevas en la mezcla.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se presentan las principales conclusiones obtenidas al finalizar la campaña experimental de esta Tesis de Master, dando respuesta a los objetivos planteados al inicio de este estudio.

5.1. Caracterización del árido reciclado

Las pérdidas producidas en el proceso de triturado de las probetas han sido de media inferior al 10%. La tasa de recuperación de árido grueso, mostró una relación entre el contenido de fibras del hormigón y el número de ciclo de reciclaje. Teniendo valores de entorno al 70-76% para hormigones sin fibra, con una disminución al 64-65% para hormigones con fibra en una sola generación, llegando hasta el 57% para hormigones con fibra en dos generaciones. Esto es debido a que tamaño de partícula también disminuye a medida que aumenta el contenido de fibra.

La calidad del árido grueso se degrada con el número de repeticiones, presentando menor densidad y mayor absorción. Obteniéndose valores de densidad de 2336 ± 26 kg/m³ para los áridos reciclados RCA-I (ambas fracciones) y $2174,2 \pm 52,3$ kg/m³ para los áridos reciclados RCA-II (ambas fracciones). La absorción de agua a 24 horas de RCA-I y RCA-II es $5,3 \pm 0,7\%$ y $8,8 \pm 0,8\%$, respectivamente, encontrándose cerca de los rangos habituales. La absorción a 1 hora alcanzó más del 90% de la capacidad de absorción a 24 horas, esto indica una matriz “débil” del hormigón “original” y mayor porosidad.

Respecto al efecto de la adición de fibra, no hubo diferencias significativas en las densidades de los áridos, Sin embargo, la absorción de agua mostró una ligera disminución al aumentar el contenido de fibra. Esto se debe a que las fibras ayudan, durante el proceso de triturado, a inducir la fractura en ITZ (interfacial transition zone) generando un árido con menos mortero adherido, lo cual podría ser interesante explorar en futuras investigaciones.

5.2. Recuperación de fibras y detección de microplásticos

La recuperación de fibras mediante la técnica de flotación, arrojó una tasa de recuperación de fibras libres de aproximadamente el 50% de la dosificación teórica de fibras y que este porcentaje puede disminuir a medida que aumenta el mortero adherido en la superficie de las fibras. Por otro lado, la separación manual, indicó que el 70% de las fibras libres se encuentran distribuidas en las fracciones 4/12 mm y 12/20 mm, especialmente en la fracción 4/12 mm.

En base al conteo manual, la tasa de recuperación de fibras incrustadas en el conjunto de las fracciones 4/12 mm y 12/20 mm, fue de aproximadamente el 30% de la dosificación teórica de fibras, presentes en mayor medida en la fracción 12/20 mm.

La técnica de incineración necesita ser estudiada más a fondo, a fin de establecer los parámetros específicos y puntos de referencia para la obtención de resultados más representativos o bien desarrollar otros posibles métodos más efectivos para la cuantificación de fibras.

Respecto a la detección de microplásticos, la validación del método no ha sido satisfactoria. Durante la etapa de “quemado” a 220° C, quedaba claro que se habían quemado más “cosas” que solo las fibras. Por lo cual, existe la necesidad de establecer nuevas metodologías más eficientes y confiables.

5.3. Propiedades mecánicas del FRC multireciclado

El análisis de las propiedades mecánicas del multireciclado de FRC, con sustitución del 100% del árido grueso, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones.

Respecto a la resistencia a la compresión a 28 días, 0-NAC y 6-NAC alcanzaron valores de 40,20 MPa y 40,00 MPa, respectivamente, siendo un 14,5% mayor que la resistencia de diseño de 35,00 MPa. Para el caso de los hormigones de la segunda generación, presentaron una caída del 25-30% respecto a la generación anterior. Esta misma tendencia ocurrió para la tercera generación, con una caída del 25% respecto a la segunda y 40% respecto a la primera. Tanto en la primera, como en la segunda generación, los hormigones con fibra presentaron una resistencia a la compresión ligeramente menor respecto a los que no contienen fibra. Estos resultados de pérdida de la resistencia se podrían contrarrestar con un aumento de la cuantía de cemento y reducción de agua para lograr alcanzar las mismas resistencias en todas las generaciones.

A pesar de las pérdidas de resistencia a medida que aumenta el número de ciclos de reciclaje, todos los hormigones alcanzaron valores de resistencia a la compresión por encima de 20 MPa.

La caída de la resistencia a compresión no se trasladó directamente a la resistencia a tracción entre las generaciones. Mas bien, se mostró una relación entre la resistencia a la tracción y el contenido de fibras, acentuándose más esta diferencia en los hormigones de la tercera generación, que demostraron que a medida que aumenta el contenido de fibras, mayor es la resistencia a la tracción en comparación con los hormigones de su misma generación fabricados con el mismo árido. El aumento más significativo se encontró entre 0-0-RAC-0 y 0-0-RAC-6, con valores de 1,75 MPa y 2,53 MPa, respectivamente, lo cual representa un aumento de la resistencia a la tracción del 45% para 0-0-RAC-6.

La pérdida del módulo de elasticidad, después de tres ciclos de reciclaje, no superó el 35%. Los resultados obtenidos, tanto a 7 días, como a 28 días, mostraron un comportamiento similar a los resultados de la resistencia a la compresión. Estos resultados son muy lógicos debido a que el árido reciclado, con más mortero adherido, es más “débil” y se deforma más bajo compresión. Además, no se encontró diferencias significativas entre los hormigones con y sin fibra. Cabe mencionar que a partir de la segunda generación existe una cierta estabilidad entre los hormigones de la segunda y la tercera generación. Sin embargo, se necesitaría realizar al menos un ciclo de reciclaje más para evaluar si esta estabilidad se mantiene.

Es de saberse que la resistencia residual está estrechamente relacionada al contenido de fibras presente en el hormigón y que está no se ve especialmente afectada por la calidad de la matriz del mismo. El análisis de la resistencia residual mediante el ensayo Barcelona permitió distinguir que, aunque la matriz de los hormigones con árido reciclado es peor a medida que aumentan los ciclos de reciclaje, la reducción de la resistencia residual de estos es menor, llegando incluso a superar a 6-NAC.

Además, se demostró que existe una resistencia residual, incluso en los hormigones sin incorporación nueva de fibras, debido a la presencia de fibras incorporadas a través del árido. Esto sugiere la existencia de un refuerzo “colateral” con la incorporación de áridos con fibras.

Finalmente podemos concluir que se considera viable la utilización de hormigón multireciclado reforzado con fibras poliméricas como hormigón estructural.

6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

En este apartado se plantean algunas posibles líneas de investigación que podrían surgir a partir de los resultados obtenidos en este estudio.

Sería interesante el estudio de la acción de las fibras en inducir la fractura en la ITZ durante el proceso de triturado, para la producción de un árido reciclado de alta calidad con menos mortero adherido y, por ende, mejores propiedades físico-mecánicas.

Es necesario el desarrollo de técnicas validas, eficientes y/o normalizadas de cuantificación y recuperación de fibras en áridos procedentes de FRC. Al igual que mejores métodos de detección de microplásticos, ya sea por métodos físicos, químicos o mecánicos.

La relación demostrada entre los RCA con fibras y la resistencia residual a tracción, plantean la necesidad futura de estudiar más a fondo esta capacidad de resistencia residual, en hormigones con incorporación de RCA con fibras, para realizar ajustes en las dosificaciones, a fin de disminuir la incorporación de fibras nuevas en la mezcla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, V., Evangelista, L. and de Brito, J. (2018) “The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete,” *Construction and Building Materials*, 188, pp. 480–489. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.178.

ACHE (2006) “Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural,” *Asociación Científico-Técnica del hormigón estructural* [Preprint], (Comisión 2-GT2/5-Hormigón Reciclado).

ACI Committee 544 (2009) “ACI 544.1R-96 - State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Structural Journal*, 96.

AENOR (1999) “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,” *AEN/CTN 146* [Preprint].

AENOR (2009a) “UNE-EN 933-11:2009. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados,” *AEN/CTN 146*, noviembre, p. 16.

AENOR (2009b) “UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón,” *AEN/CTN 146*, mayo, p. 60.

AENOR (2010a) “UNE 83515:2010. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona,” *AEN/CTN 83* [Preprint].

AENOR (2010b) “UNE-EN 12390-6:2010. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas,” *AEN/CTN 83* [Preprint].

AENOR (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,” *AEN/CTN 146* [Preprint].

AENOR (2014) “UNE-EN 12390-13:2014. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión,” *AEN/CTN 83* [Preprint].

AENOR (2020a) “UNE-EN 12350-2:2020. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento,” *AEN/CTN 83* [Preprint].

AENOR (2020b) “UNE-EN 12390-3:2020. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas,” *AEN/CTN 83* [Preprint].

Aidarov, S., Mena, F. and de la Fuente, A. (2021) “Structural response of a fibre reinforced concrete pile-supported flat slab: full-scale test,” *Engineering Structures*, 239(112292).

ANEFA (2020) “Revista anual 2019/2020,” *Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos*, p. 60.

Bolomey, J. (1935) “Granulation et prévision de la résistance probable des bétons,” *Travaux*, 30, pp. 228–232.

CEDEX (2014) “Catálogo de residuos utilizables en construcción,” *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente* [Preprint].

Comisión Europea (2010) “Reglamento (UE) n° 849/2010 de la Comisión, de 27 de septiembre de 2010, por el que se modifica el Reglamento (CE) n° 2150/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a las estadísticas sobre residuos,” *DOUE*, 28 septiembre, p. 40.

Comisión Europea (2014a) “Decisión de la Comisión de 18 de diciembre de 2014 por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2014/955/UE),” *DOUE*, L 370, 30, pp. 44–86.

Comisión Europea (2014b) “Reglamento (UE) No 1357/2014 de la Comisión de 18 de diciembre de 2014 por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas,” *DOUE*, L 365, 19, pp. 89–96.

Comisión Europea (2016) “Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE,” *Comisión Europea y ECORYS. Ref. Ares(2016)6914779 - 12/12/2016, septiembre*, p. 61.

Correia Prata, J. et al. (2019) “Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review,” *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 110, pp. 150–159. doi:10.1016/j.trac.2018.10.029.

Domingo-Cabo, A. et al. (2009) “Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, 23(7), pp. 2545–2553. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018.

Etxeberria, M. et al. (2007) “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,” *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp. 735–742. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002.

Eurostat (2017) “Waste Statistics/es. Statistics Explained,” *Comisión Europea, 12 de diciembre*, p. 13.

Eurostat (2018) “Waste Statistics, gestión de residuos (env_wasgen),” *Eurostat* [Preprint].

Eurostat (2020) “Energy, transport and environment statistics,” *Eurostat*, pp. 109–111.

Fischer, C. and Werge, M. (2009) “EU as a Recycling Society. Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU. ETC/SCP working paper 2/2009,” *European Topic Centre on Resource and Waste Management. European Environment Agency*, Abril, pp. 1–73.

Fuller, W.B. and Thompson, S.E. (1907) “The Laws of Proportioning Concrete,” *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, LIX(2), pp. 67–143.

Galeote, E. et al. (2017) “Correlation between the Barcelona test and the bending test in fibre reinforced concrete,” *Construction and Building Materials*, 152, pp. 529–538.

Galeote Moreno, E., de la Fuente Antequera, A. and Aguado de Cea, A. (2019) “Optimización del control de calidad para hormigón con fibras mediante el ensayo barcelona y el método inductivo,” *III Congreso de Consultores de Estructuras*, pp. 1074–1082.

- GERD (2012)** “Guía Española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Proyecto GEAR,” *Asociación Española de Gestores de RCD (GERD)*, p. 142.
- Gómez, J.M., Agulló, L. and Vázquez-Ramonich, E. (2001)** “Cualidades Físicas y Mecánicas de los Agregados Reciclados de Concreto. Aplicación en Concretos,” *Construcción y Tecnología*, 13,157, pp. 10–20.
- Gómez, J.M., Vázquez, E. and Agulló, L. (2001a)** “Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material,” *Monografía CIMNE*, No. 60.
- Gómez, J.M., Vázquez, E. and Agulló, L. (2001b)** “Strength and deformation properties of recycled aggregate,” *Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent advances in concrete technology* [Preprint].
- González-Fontebo, B. and Martínez-Abella, F. (2005)** “Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties,” *Materiales de Construcción*, 55, 279, pp. 53–66.
- Greig, R.K. et al. (1984)** “Un procedimiento para hacer un material de cemento compuesto, reforzado con fibras de vidrio,” *Gran Bretaña Patente 8417351* [Preprint].
- Huda, S.B. and Alam, M.S. (2014)** “Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, 65, pp. 574–582. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.010.
- IHOBE (2009)** “Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco,” *Sociedad Pública del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco*, p. 44.
- Ikumi, T. et al. (2021)** “Neural network-aided prediction of post-cracking tensile strength of fibre-reinforced concrete,” *Computers & Structures*, 256.
- Jefatura del Estado (2011)** “Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados,” *BOE*, 181, 29 de, p. 56.
- Jovells, F.J.D. (2016)** *Estudio técnico experimental de hormigones con fibras de polipropileno, fibras metálicas y áridos reciclados para su utilización en pavimentos de baja intensidad de tráfico.*
- Kou, S.C. and Poon, C.S. (2013)** “Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash,” *Cement and Concrete Composites*, 37(1), pp. 12–19. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011.
- Kou, S.C., Poon, C.S. and Etxeberria, M. (2011)** “Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete,” *Cement and Concrete Composites*, 33(2), pp. 286–291. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.10.003.
- Kunieda, M., Ueda, N. and Nakamura, H. (2014)** “Ability of recycling on fiber reinforced concrete,” *Construction and Building Materials*, 67(PART C), pp. 315–320. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.060.
- Laserna Arcas, S. (2015)** “Avances en el comportamiento del hormigón reciclado: fabricación, propiedades mecánicas y simulación numérica,” p. 280. Available at: <http://hdl.handle.net/10578/7411>.

Maccaferri (2005) “Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón,” *Manual Técnico* [Preprint].

Massicotte, B., Degrange, G. and Dzeletovic, N. (2000) “Mix design for SFRC bridge deck construction,” *Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)*, pp. 119–128.

Ministerio de Agricultura, A. y M.A. (2015) “Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión d,” *BOE*, 297, 12 de, p. 5.

Ministerio de Fomento (2008) “EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural,” *BOE*, 203, 22 de, pp. 35176–35178.

Ministerio de la Presidencia (2008) “Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición,” *BOE*, 38, 13 de, p. 11.

Ministerio de Medio Ambiente (2001) “Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición,” *BOE*, 166, 12 de, pp. 25305–25313.

Ministerio de Medio Ambiente (2002) “Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos,” *BOE*, 43, 19 de, pp. 6494–6515.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009) “Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008- 2015 (PNIR),” *BOE*, 49, 26 de, pp. 19893–20016.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2018) “Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos,” *DOUE*, L 150, 14, pp. 109–140.

Pérez Sánchez, M. (1998) “Relación entre la resistencia a compresión de probetas-testigo y probetas normalizadas,” *Materiales de Construcción*, 48(249), pp. 45–53. doi:10.3989/mc.1998.v48.i249.486.

Pujadas Álvarez, P. et al. (2014) “Correlación entre TCO y desplazamiento axial en el ensayo Barcelona,” *Asociación Científica del Hormigón Estructural (ACHE)* [Preprint].

Pujadas, P., Aguado, A. and Vandewalle, M. (2008) “Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno,” *Universidad Politécnica De Cataluña* [Preprint].

Sague-Crentsil, K.K., Brown, T. and Taylor, A.H. (2001) “Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate,” *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 707–712.

Salem, R.M. and Burdette, E.G. (1998) “Role of chemical and mineral admixture on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete,” *ACI Materials Journal*, pp. 558–563.

Sánchez de Juan, M. (2005) *Estudio sobre la utilización de árido reciclado en hormigón estructural.*

Sánchez Roldán, Z. (2019) “Utilización de árido reciclado para la fabricación de piezas de hormigón prefabricado de mobiliario urbano,” *Universidad de Granada*, p. 281.

Serna, P. and Arango, S. (2008) “Evolution of the flexural behaviour of precracked SFRC in marine environment,” *BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*, pp. 595–605.

Silvia, R. v., de Brito, J. and Dhir, R.K. (2014) “Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production,” *Construction and Building Materials*, 65, pp. 201–217.

Suárez Silgado, S.S. (2015) “Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la producción de materiales pétreos,” *Universitat Politècnica de Catalunya* [Preprint].

Symonds et al. (1999) “Construction and demolition waste management practices and their economic impacts,” *Report to DGXI, European Commission, february*, p. 83.

UEPG (2017) “European aggregates association. A sustainable industry for a sustainable Europe. Annual Review 2016-2017,” *Union Européenne des Producteurs de Granulats. Brussels-Belgium* [Preprint].

Villoria Sáez, P. (2014) “Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra,” *Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Edificación*, p. 111.

Wang, W.L., Kou, S.C. and Xing, F. (2013) “Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates,” *Construction and Building Materials*, 48, pp. 187–193. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.065.

Zhu, P.H. and Lei, Y. (2014) “Research on strength properties of concrete using aggregates from repeatedly recycling concrete waste,” *Applied Mechanics and Materials*, 665, pp. 147–150. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.665.147.