

# Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Trabajo realizado por:

**Muneer Ahmad**

Dirigido por:

**Nikola Tošić**

**Albert De La Fuente Antequera**

Grado en:

**Ingeniería Civil**

Barcelona, **29 de junio de 2022**

Departamento de ingeniería civil y ambiental

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

# Agradecimientos

---

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores, Albert de la Fuente y Nikola Tošić, por su apoyo, ayuda y paciencia que han tenido durante la realización de esta tesis. A Albert por apoyo, ayuda y haber confiado en mí para la realización de este proyecto. A Nikola por su colaboración y esfuerzo diario durante la realización y diseño de la campaña experimental, y por su paciencia y enseñanza durante la realización de esta tesis.

Quiero agradecer también a todas aquellas personas que directa o indirectamente me han ayudado durante este proceso, sobre todo a los técnicos del laboratorio de tecnología y estructuras Luis Agulló “LATEM”.

En particular, agradecer a Igor Reynvart, técnico del laboratorio y compañero de carrera, que durante toda la campaña experimental nos ha brindado su apoyo y nos ha ayudado en todo el proceso.

Quiero agradecer también a mis compañeros de la carrera, por su apoyo y hacer que esta etapa universitaria única e inolvidable.

Por último, quiero agradecer a mi familia, que siempre han estado conmigo, sobre todo en momentos difíciles, que han confiado en mí y me han apoyado durante todo momento.

# Resumen

---

Actualmente, el uso de hormigón reforzado con fibras se está convirtiendo en una solución habitual. Debido a los estudios realizados, la buena respuesta estructural que ofrece, la puesta en obra y el ahorro económico respecto a los hormigones reforzados con armadura tradicional, convierten los hormigones reforzados con fibras en una solución más eficiente y común.

A pesar de los diversos estudios realizados durante los últimos años sobre los hormigones reforzados con fibras que destacan sus ventajas estructurales, los temas relacionados con la demolición y el posterior reciclado de los hormigones reforzados con fibras no han sido abordado y, por lo tanto, se desconocen los aspectos relacionados con su reciclabilidad y su reusabilidad se desconocen.

Para dar respuesta a las cuestiones que se plantean sobre la reciclabilidad y la reusabilidad de los hormigones con fibras, la presente tesis plantea una campaña experimental 3 generaciones para caracterizar los áridos reciclados y posteriormente caracterizar los hormigones fabricados con los áridos reciclado.

La campaña experimental consiste en a partir de los áridos naturales fabricar la primera generación, y posteriormente, fabricar 2 generaciones con una sustitución del árido grueso del 100%. Con cada tipo de árido se fabricarán 2 tipos de hormigones, uno con volumen de fibra adicionales de  $6 \text{ kg/m}^3$ , y otro con  $0 \text{ kg/m}^3$  de fibras adicionales.

Los resultados obtenidos indican una bajada de calidad tanto en los áridos como en las propiedades del hormigón, a medida que aumentan los ciclos de reciclaje. Los áridos presentan una disminución de densidad y un aumento en la absorción de agua a medida que aumentan los ciclos de reciclaje. Por otra parte, la resistencia de compresión y el módulo elástico no se ven afectados por la adición de fibras, y disminuyen los valores de estas propiedades a medida que aumentan los ciclos de reciclaje. Los valores resistencia de la resistencia a tracción aumentan ligeramente con el contenido de fibras.

Por su parte y como era de esperar, los hormigones, que no llevan fibras adicionales pero sus áridos si las llevan, debido a que proceden de hormigones con fibras, presentan resistencia residual.

# Abstract

---

Nowadays, the use of fibre-reinforced concrete is becoming a common solution. Due to the studies conducted, the good structural response it offers, the ease of installation and the economic savings compared to concretes reinforced with traditional reinforcement, make fibre-reinforced concretes a more efficient and common solution.

Despite the numerous studies carried out in recent years on fibre-reinforced concretes highlighting their structural advantages, the issues related to the demolition and subsequent recycling of fibre-reinforced concretes have not been addressed and, therefore, the aspects related to their recyclability and reusability are unknown.

To answer the questions raised about the recyclability and reusability of fibre-reinforced concretes, this thesis proposes a 3-generation experimental campaign to characterise the recycled aggregates and subsequently characterise the concretes manufactured with the recycled aggregates.

The experimental campaign consists of manufacturing the first generation from natural aggregates, and then manufacturing 2 generations with a 100% replacement of the coarse aggregate. With each type of aggregate, 2 types of concrete will be produced, one with an additional fibre volume of 6 kg/m<sup>3</sup>, and the other with 0 kg/m<sup>3</sup> of additional fibres.

The results obtained indicate a decrease in the quality of both the aggregates and the properties of the concrete as the recycling cycles increase. The aggregates show a decrease in density and an increase in water absorption as the recycling cycles increase. On the other hand, compressive strength and elastic modulus are not affected by the addition of fibres, and the values of these properties decrease with increasing recycling cycles. Tensile strength values increase slightly with fibre content.

On the other hand, as expected, the concretes, which do not contain additional fibres but whose aggregates do contain fibres, since they come from concretes with fibres, show residual strength.

# ÍNDICE

Agradecimientos .....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Introducción .....	1
1.1    Objetivos .....	2
1.1.1    Objetivo general .....	2
1.1.2    Objetivos específicos.....	2
1.2    Estructura de la tesis.....	2
2.    Estado del arte .....	4
2.1    Residuos de construcción y demolición .....	4
2.2    Aplicaciones de áridos reciclados .....	8
2.2.1    Propiedades de áridos reciclados.....	10
2.3    Hormigón con árido reciclado.....	10
2.3.1    Propiedades de hormigón con árido reciclado.....	11
2.4    Hormigón con fibras.....	14
2.4.1    Propiedades del hormigón reforzado con fibras.....	14
2.5    Comentarios y conclusiones:.....	15
3.    Campaña experimental .....	16
3.1    Fases campaña experimental:.....	16
3.2    Plan de la campaña experimental .....	17
3.3    Materiales empleados:.....	21
3.3.1    Cemento: .....	21
3.3.2    Aditivos:.....	21
3.3.3    Fibras sintéticas: .....	21
3.3.4    Áridos:.....	21
3.4    Dosificaciones y fabricación del hormigón.....	23
3.5    Proceso de fabricación .....	24
3.6    Descripción de las probetas.....	26
3.7    Métodos empleados:.....	27
3.7.1    Caracterización y obtención de áridos:.....	27
3.7.2    Contenido de fibras: .....	28
3.8    Caracterización hormigón .....	31
3.8.1    Estado Fresco .....	31
3.8.2    Estado Endurecido:.....	32
4.    Resultados obtenidos.....	36

4.1	Caracterización de los áridos.....	37
4.1.1	Obtención de áridos.....	37
4.1.2	Contenido de fibras .....	38
4.1.3	Contenido de finos .....	40
4.1.4	Absorción y densidad .....	41
4.1.5	Granulometría.....	44
4.2	Caracterización del hormigón .....	45
4.2.1	Consistencia .....	45
4.2.2	Resistencia a compresión .....	46
4.2.3	Resistencia a tracción .....	49
4.2.4	Módulo de elasticidad .....	50
4.2.5	Resistencia residual .....	52
5.	Conclusiones .....	56
5.1	Caracterización de los áridos.....	56
5.2	Caracterización del hormigón: .....	57
	Bibliografía .....	59

# Capítulo 1

## Introducción

La valorización de los residuos de la construcción y demolición es uno de los grandes retos a los que se enfrenta actualmente el sector de la construcción. Actualmente, en el sector de la construcción en Europa se genera 820 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición cada año, esto es alrededor de 46% de total del residuo que se genera. (Eurostat, 2017). Aunque se generan grandes cantidades de residuos, su impacto sobre el medioambiente se puede considerar menor al resto de residuo. Esto es debido a que el 85% de los residuos son hormigones, cerámicos entre otros, lo cual es considerado como un residuo inerte por la falta de reacciones químicas que puedan afectar el medio ambiente. (J.L. Gálvez-Martos, D. Styles, H.Schoenberger, B.Zeschmar-Lahl, 2018).

Uno de los problemas que afronta el uso de áridos reciclados es, el bajo coste de los materiales naturales excavados, esto añadido al hecho de la creencia o mal entendimiento del bajo rendimiento de los áridos reciclado, (Adams et al., 2016). hace que el uso de los materiales reciclados aun sea menor.

Como pasa en caso de España y algunos miembros de la Unión Europea, el hecho de tener un mercado de materiales naturales muy asequibles. La extracción de estos materiales tendría un coste muy similar a los materiales reciclados. Además, el impacto medioambiental de los áridos naturales y reciclados, en términos de las emisiones de gases de efecto invernadero depende en gran medida de su transporte (Blengini y Garbarino, 2010).

El uso de materiales reciclado mayormente se reduce a un uso no estructural, rellenos de zanjas con zahorras recicladas o pavimentaciones. De hecho, para un uso estructural, el material

utilizado suele ser natural o un pequeño porcentaje de material reciclado. Pero es difícil encontrar casos de uso estructural con materiales 100% reciclados.

Como se ha comentado y debido al desconocimiento, los materiales obtenidos de la demolición hasta ahora se han ido utilizando como zahorra, o para hormigones con 20% de áridos reciclado, y para usos no estructurales.

El objetivo de esta tesis es abordar los temas relacionados con la reciclabilidad de residuos de construcción y estudiar la viabilidad de un hormigón estructural con 100% áridos reciclados.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis es estudiar la viabilidad estructural de un hormigón reforzado con fibras y sometidos a varios ciclos de reciclaje. Para llegar al objetivo, se ha llevado a cabo una campaña experimental, donde se estudió tanto las características de los árido como las propiedades mecánicas del hormigón empleando diferentes metodologías.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos expuestos en este apartado nos ayudaran a conseguir el objetivo principal de esta tesis.

- Realizar una campaña experimental de un hormigón de 3 generaciones. La primera de áridos naturales y las siguientes con los áridos 100% reciclados de la generación anterior.
- Estudiar y emplear métodos para alcanzar el objetivo principal de la tesis. Emplear métodos para caracterización de los áridos, así como para estudiar las propiedades mecánicas del hormigón.
- Estudiar las características de los áridos reciclados.
- Estudiar las características mecánicas del hormigón a medida que se aumentan los ciclos de reciclaje, así como la influencia de las fibras añadidas.
- Estudiar y analizar los resultados obtenidos y sacar las conclusiones pertinentes.

## 1.2 Estructura de la tesis

En este apartado se describe brevemente la estructura general de la tesis. La tesis está compuesta por 5 capítulos. Cada uno de ellos contiene la información necesaria para alcanzar el objetivo principal de esta tesis. A continuación, se describen cada uno de ellos.

- **Capítulo 1. Introducción.** En este capítulo se describe la temática de la tesis, así como los objetivos principales y específicos del.

- **Capítulo 2. Estado del arte.** En este capítulo se expone las investigaciones realizadas acerca de la temática de la tesis. Se expone, entonces, los conocimientos acerca de los áridos reciclados, hormigones con áridos reciclados y hormigones con fibras.
- **Capítulo 3. Campaña experimental.** En este capítulo se describe todo el proceso de la campaña experimental. Desde los materiales utilizados, la fabricación del hormigón hasta los métodos empleados tanto para la caracterización del hormigón como la caracterización de los áridos.
- **Capítulo 4. Resultados obtenidos.** En este capítulo se expone los resultados obtenidos durante la realización de la campaña experimental, así como el análisis de dichos resultados.
- **Capítulo 5. Conclusiones.** En este capítulo se expone, a partir del análisis de los resultados, las conclusiones obtenidas.

## Capítulo 2

### 2.Estado del arte

El objetivo de este capítulo es exponer las investigaciones que se han hecho hasta el momento acerca de la temática del proyecto, el hormigón multi-reciclado con fibras. Se hace un estudio de recerca desde la fabricación del hormigón hasta la demolición, pasando por las diferentes fases.

Se ha hecho un estudio sobre el residuo que se genera a partir de las construcciones y demoliciones y, su impacto ambiental. También se ha hecho una investigación sobre los áridos que reciclado, sus características y posibles aplicaciones.

Por otra parte, se ha hecho una recerca sobre las investigaciones que se han hecho sobre el hormigón con áridos reciclado y como afecta la implantación de estos áridos a las diferentes propiedades del hormigón, como pueden ser la resistencia a compresión, a tracción y el módulo elástico.

Por último, también se comentará el hormigón con fibras y la resistencia residual.

#### 2.1 Residuos de construcción y demolición

Actualmente el sector de la construcción se enfrenta a uno de los retos más importante, la revalorización de los residuos procedentes de la construcción y demolición. El sector de la construcción es uno de los sectores que más residuo genera durante al año. Actualmente en Europa, se genera un total de 820 millones toneladas de residuos procedentes de la construcción y demolición, que es el 46% del total de residuos que se genera durante al año. (Eurostat, 2017).

En comparación a otros residuos, el impacto ambiental de los residuos de la construcción y demoliciones son menores pero las grandes cantidades de residuos hacen que los impactos ambientales derivados de logística u ocupación del terreno son significativos. En caso de España, aunque se han alcanzado el objetivo de la segregación de los residuos de construcción y demolición, las tasas de reciclajes son muy menores (Joint Research Centre - European Commission, 2012), y eso es principalmente debido a los bajos costes de los materiales naturales. Por lo tanto, el ahorro económico es una de las principales desventajas de los materiales reciclados respecto a los naturales. Esto añadido a la confusión sobre el rendimiento del hormigón con los áridos reciclados respecto a los naturales (Adams et al., 2016). Algunos investigadores han probado, que, si se separan de manera correcta, los hormigones con áridos reciclados pueden tener una buena calidad. (Adams et al., 2016; McGinnis et al., 2017; Silva et al., 2014; Wijayasundara et al., 2017).

Los aridos procedentes de la construcción y/o demolición pueden ser de distintos tipos. Se pueden clasificar de en varios tipos según las características del material, como puede ser la propiedad granulométrica, la composición. La "Guía Española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición" (GERD, 2012) establece una calificación de áridos con el objetivo de clasificar los materiales con un sistema universal. Esta clasificación se muestra a continuación:

Nomenclatura	Nombre	Características
ARH	Áridos Reciclados de Hormigón	P + H > 90% C < 10% A < 5% X < 1%
ARMh	Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón	P + H > 70% C < 30% A < 5% X < 1%
ARC ARMc	Áridos Reciclados Cerámicos. Áridos Reciclados Mixtos de Cerámicos.	P + H < 30% C < 30% A < 5% X < 1% C > 70% A < 5% X < 1%
ARC ARMc	Áridos Reciclados Cerámicos. Áridos Reciclados Mixtos de Cerámicos.	P + H < 70% C < 70% A < 5% X < 1% C > 30% A < 5% X < 1%
ARMa	Áridos Reciclados Mixtos de Asfalto.	5% < A < 30% X < 1%

Tabla 1: clasificación de los áridos según la composición fuente: (GERD, 2012) (P + H, es piedra Natural + hormigón/mortero adherido, C es áridos cerámicos, A es árido de asfalto, X es material impropio.)

Como se puede ver en la tabla 1, si el contenido de los materiales impropios es igual o mayor al 1% en peso, se considera material no reciclado. Y por lo pasa a definirse como un residuo inerte.

Podemos observar también que los materiales se han clasificado en 5 categorías (GERD, 2012) que son las siguientes:

**Áridos reciclados de hormigón:** son aquellos materiales que presentan un contenido de hormigón o piedra natural (sin mortero adherido) del 90% o más en peso.



Figura 1: Áridos reciclados con hormigón. (Fuente: Sorres i Graves EGARA)

**Áridos reciclados mixtos de hormigón:** son aquellos donde el contenido de hormigón o piedra natural es del 70%, y el contenido de cerámicos es menor al 30%.



Figura 2: Áridos mixtos de hormigón (fuentes: BTB, planta de reciclaje de RCD's)

**Áridos reciclados cerámicos:** son aquellos materiales reciclados donde el contenido de materiales cerámicos es mayor al 70%.



Figura 3: Áridos cerámicos. (fuente: Tracex.eu)

**Áridos reciclados mixtos de cerámicos:** son aquellos donde el contenido de materiales cerámicos supera el 30% en peso.



Figura 4: Áridos mixtos cerámicos. (Fuente: Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2011)

**Áridos reciclados con asfalto:** son aquellos materiales reciclados donde el contenido de materiales bituminosos es de entre un 5% y un 30%.



Figura 5: Áridos con asfalto. (Fuente: Áridos casa)

### Marco normativo:

La producción y gestión de los residuos de construcción y demolición esta regulad por El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero. *Este Real Decreto constituye el instrumento normativo específico en materia de RCD. Establece, entre otras, las siguientes obligaciones: el productor de RCD ha de incluir en el proyecto de ejecución de obra un Estudio de gestión de residuos, el poseedor o la persona física o jurídica que ejecute la obra, ha de presentar un Plan de gestión de RCD para la aplicación del mencionado estudio. Asimismo, se ha de asegurar la correcta gestión de los residuos, aplicando el principio de jerarquía de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, contribuyendo, de esta forma, al desarrollo sostenible del sector de la construcción.*

Para hacer frente a al reto de valorización de residuos de construcción y demolición y a fomentar un uso más eficiente de los materiales naturales, la Comisión Europea también ha aprobado una comunicación sobre las “Oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción” COM (2014) 445 final.

Como se ha comentado anteriormente, la Comisión Europea también destaca la desventaja del bajo coste de los materiales vírgenes respecto a los materiales reciclado. Para hacer frente al problema la Comisión Europea propone las siguientes practicas:

- Reducir el número de RCD destinados a operaciones de relleno y al depósito de vertederos; bien mediante un aumento de tasas, o bien mediante medidas reguladoras.
- Estimular el uso de materiales reciclados mediante la integración de los costes ambientales en los precios de los materiales naturales.
- Normalizar los requisitos de calidad y seguridad de los materiales reciclados.

## 2.2 Aplicaciones de áridos reciclados

El continuo crecimiento ya sea industrial o el crecimiento de la población hacen que sea necesaria la creación de grandes infraestructura y residencias lo que conlleva la demolición y/o la reconstrucción de otras infraestructuras ya sea por la vida útil y/o la ampliación. Estas actividades de construcción y demolición llevan a generar grandes cantidades de residuos que tiene un gran impacto sobre el medioambiente, y que debe ser gestionado y reciclado, reduciendo así la excavación de materiales naturales a medida de lo posible.

J.-L. Gálvez-Martos (2018) propone los posibles usos que se le puede dar a los residuos de construcciones y demoliciones, dependiendo de si son áridos reciclados de hormigón o mixtos y según las especificaciones y/o restricciones. Los áridos reciclados de hormigón podrían tener los siguientes posibles usos:

Trabajos de tierra/rellenos y subbases de calzadas: en este caso, los requerimientos de la Unión Europea son lo mismo que para los áridos naturales. Una de las restricciones que afecta a las propiedades físicas es la absorción de agua de estos materiales.

Otras de los usos que se podría dar sería, el uso no estructural en edificios y otras obras civiles, donde se podría emplear hasta el 100% de áridos reciclados.

Por último, también se le podría dar un uso estructural en edificios y obras civiles, pero debido a la absorción habrá una elevada cantidad de agua lo que llevaría a una reducción de resistencia a compresión. Debido a esto, las recomendaciones para hormigones de uso estructural son, la sustitución del 20% del árido natural por el árido reciclado.

A parte de los posibles usos, existen casos reales de diferentes aplicaciones de los residuos/áridos procedentes de la construcción y demolición. Estos se muestran a continuación:

Aplicaciones en la calzada: como ya se sabe las calzadas están compuestas por varias capas, y las capas subbases la resistencia es menos importante en comparación a la resistencia absoluta de la calzada. Por este motivo y para reducir el uso de materiales naturales (vírgenes), se han llevado a cabo varios estudios a nivel mundial para evaluar el uso de áridos reciclados como subbases en las infraestructuras de carreteras.

Muchos autores han estudiado el uso de áridos reciclados como subbase de carreteras. Entre ellos se destacan los autores, Haider et al. (2014), Kolay y Akentuna (2014). Los autores mencionados estudiaron la aplicación de los áridos reciclados sustituyendo los áridos naturales en las capas bases de carreteras. Estos autores llegaron a la conclusión de que los materiales reciclados presentaban unas características físicas y geomecánicas similares a los naturales como capas subbases.

Otro autor, Barbudo et al. (2012) ha hecho un estudio en la zona mediterránea. De su estudio se destaca el uso de áridos reciclados mixtos como subbases de calzadas. El autor concluyó el uso de los áridos mixtos cerámicos como subbase para calzadas de baja intensidad, debido a la buena capacidad mecánica y los índices CBR obtenidos.

Hormigón de pavimento: el uso de hormigón reciclado para pavimentación es una de las principales aplicaciones de este tipo de hormigón. Nassar y Soroishian han hecho una investigación sobre el uso de hormigón reciclado como pavimento de calzada bajo unas condiciones de tráfico pesado y unas condiciones meteorológicas agresivas. Los resultados obtenidos a los 270 días muestran un comportamiento parecido o mejor en controles de edades avanzadas de hormigón. Las resistencias obtenidas en edades avanzadas, y la durabilidad hacen que sea un hormigón adecuado como pavimento.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los retos más importantes del sector de la construcción es la valorización de los áridos reciclados. El uso de áridos reciclado este sujeto a algunas barreras, ya sean culturales o malas interpretaciones. Hay diferentes factores que tiene influencia sobre el mercado de áridos reciclados, estos se comentan a continuación:

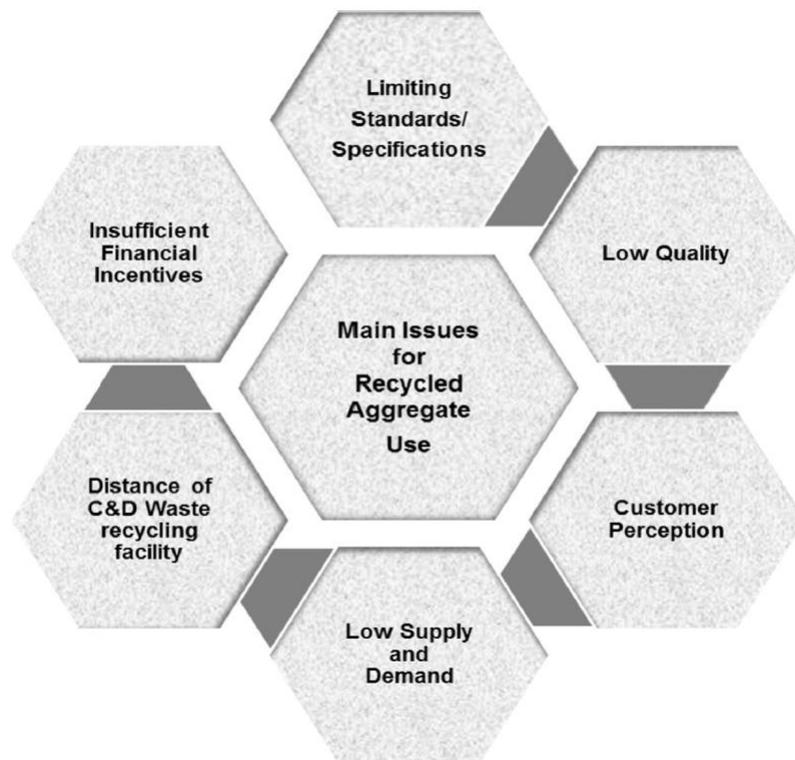


Figura 6: factores/barreras que reducen el uso de áridos reciclados. Fuente (R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, 2017)

Como podemos observar en la figura 6, unos de los factores que hacen el uso de áridos reciclados no se expanda son las especificaciones. Aunque los áridos reciclados sean de muy buena calidad, genera desconfianza referente a su calidad. Esto implica si los áridos reciclados cumplen los requisitos y tiene un coste muy menor a los naturales, serían utilizados, en caso contrario se prefiere áridos naturales.

Otras de las desventajas son el número de plantas de reciclajes. Al haber pocas plantas de reciclajes, no existen grandes cantidades de áridos reciclados y dependiendo de donde se encuentre, el coste de transporte de este material supone un uso reducido de áridos reciclados.

Otra de las desventajas es, la confianza en los materiales reciclados. Los clientes prefieren el uso de áridos naturales en hormigones en vez de áridos reciclado.

### 2.2.1 Propiedades de áridos reciclados

Las propiedades de los materiales en general, son importantes conocerlas para hacer un uso correcto de estos. En referencia a los áridos reciclados, es importante conocer las propiedades físico-mecánicas, para luego fabricar un hormigón de buena calidad y que cumpla los requisitos para lo que está diseñado. Entre las propiedades de áridos reciclados, es importante saber la absorción de agua y la densidad, dado que tendrán influencia sobre la resistencia del hormigón fabricado.

#### **Densidad**

la densidad es una de las propiedades más importantes de los áridos. Dependiendo de los valores de la densidad, podría afectar para mejor o peor las propiedades mecánicas del hormigón. Algunos estudios demuestran la correlación entre la densidad y la resistencia a compresión del hormigón. (Bazaz J. B.; Khayati M.; Akrami N. (2006)) los resultados demuestran que si mayor es la densidad de los áridos mayor es la resistencia a compresión del hormigón. Khalaf F. M. (2006). También demuestra que cuanto mayor es la densidad mayor es la resistencia a compresión.

La densidad de los áridos reciclados suele ser menor a los áridos naturales. Esto se debe a la existencia del mortero adherido al árido. Como el mortero es menos denso que los áridos naturales, hace que los áridos reciclados sean menos densos que los áridos naturales. (Hansen T. C. (1992)) (Barra M.; Vázquez E. (1998))

#### **Absorción de agua:**

la absorción de agua es otro de los factores importantes en los áridos. Los áridos naturales suelen tener unos valores de absorción de entre 0,5 – 1,5% (R.V. Silva, 2015) y que generalmente no se tiene en cuenta a la hora de fabricar el hormigón. Pero en los áridos reciclados es un factor importante, dado que, si no añade el agua de absorción de los áridos, puede no haber agua suficiente para el fraguado y por lo tanto afectaría a las propiedades mecánicas del hormigón.

La adherencia del mortero en el árido reciclado puede afectar la absorción de agua del árido reciclado. Al haber mortero adherido al árido, implica que se mas poroso y por lo tanto la absorción de agua se mayor.

## 2.3 Hormigón con árido reciclado

El hormigón reciclado es una de las alternativas para reducir los residuos generados por las actividades de construcción y demolición. Pero como hemos comentado anteriormente el desconocimiento y la mala reputación de hormigones con áridos reciclado hace que su uso sea más limitado.

Actualmente existen normas que regulan el uso de áridos reciclado en los hormigones de uso estructural.

La normativa que el uso de hormigón estructural y los requisitos a cumplir es la EHE-08, instrucción de hormigón estructural. En el anejo 15; *Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados*. En las recomendaciones indica claramente las limitaciones de hormigón con áridos reciclados. La cantidad de áridos reciclados no pueden superar el 20% de los áridos y en ningún caso menores al 4mm. También indica que la máxima resistencia característica no puede superar los 40MPa. En caso de superar los límites, debe haber un estudio que verifique el uso de dicho tipo de hormigón.

Actualmente se están diseñando códigos de hormigones estructurales con áridos reciclados para integrarlos en el *nuevo Código Modelo 2020 de la fib* y el nuevo *Euro código 2*.

### 2.3.1 Propiedades de hormigón con árido reciclado

#### Resistencia a compresión:

La resistencia a compresión es una de las propiedades más importantes para diseñar una estructura. Es la propiedad que define y representa el tipo de hormigón.

De forma general, se da por hecho que la resistencia a compresión de un hormigón con áridos reciclado suele ser menor que un hormigón convencional. (R.A. Silva, 2015) comenta en su tesis sobre la influencia de los áridos reciclados en los hormigones que, para la misma ratio a/c, a medida que se aumentan los porcentajes de sustitución del árido natural por el árido reciclado, la resistencia de compresión disminuye. El autor comenta que esta disminución principalmente se debe a las propiedades del árido.

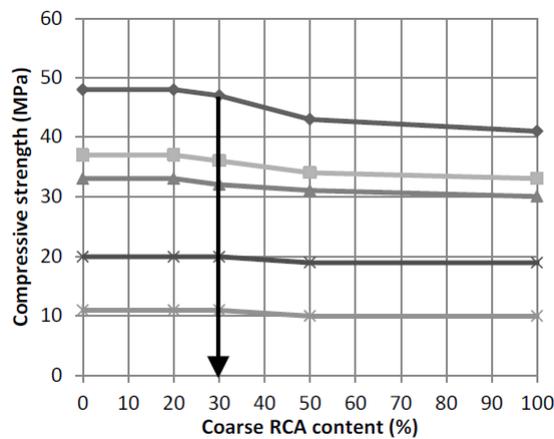


Figura 7: la relación entre la resistencia a compresión y el contenido de áridos reciclados. Dhir R. K.; Paine K. A. (2004)

Como se puede ver en la figura 7, los autores establecieron que la sustitución de los áridos reciclados, del 20 hasta 30% tienen un impacto marginal sobre la resistencia a compresión del hormigón. Es el punto a partir del cual la resistencia empieza a bajar gradualmente.

La resistencia de un hormigón compuesto por un 100% áridos reciclados o un 50% de áridos reciclados, disminuye entre un 20% y 30% que el hormigón convencional o de áridos naturales. 42, 57, 204

Otros autores (J. Eiras-López, S. Seara-Paz, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella (2017)) estudiaron la evolución de la resistencia a compresión en el tiempo. Esta evolución se comenta a continuación:

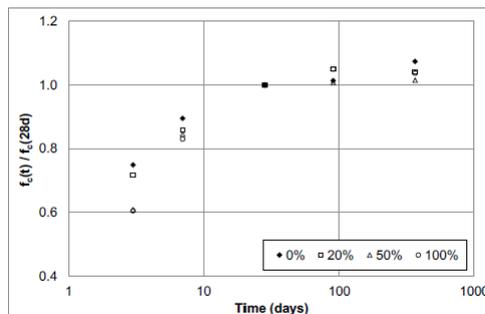


Figura 8: Evolución de resistencia a compresión en el tiempo. J. Eiras-López, S. Seara-Paz, B. González-Fontebova, F. Martínez-Abella (2017)

En la figura 8 se observa la evolución de la resistencia en el tiempo. Se puede observar que el comportamiento de hormigón con áridos reciclados es diferente al convencional, sobre todo en la edad temprana. Si miramos la resistencia a los 3 días, el hormigón convencional alcanza el 74% de su resistencia a 28 días, mientras que el reciclado alcanza solo el 64% de su resistencia a 28 días. A los 7 días, sigue habiendo diferencia, el hormigón con áridos reciclados alcanza el 85% de su resistencia a 28 días mientras que el hormigón convencional el 90% de su resistencia a 28 días. En las edades más avanzadas, tanto a 90 días como a 365 días, estas diferencias entre el hormigón convencional y el hormigón con áridos reciclados son insignificantes.

### Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad al igual que la resistencia a compresión es una de las propiedades más importantes a la hora de diseñar las estructuras a servicio donde el principal objetivo es el control de las fisuras y las deformaciones.

En su tesis, (R.A. Silva, 2015) comenta la relación entre los áridos reciclados, el módulo elástico y la resistencia a compresión. El autor comenta que las investigaciones que se han llevado a cabo hasta el momento indican claramente la relación contenida de árido reciclado – módulo de elasticidad. A medida que aumenta la cantidad de árido reciclado en el hormigón disminuye claramente el módulo de elasticidad. Esta disminución hace que las deformaciones que se producen en el hormigón/estructuras sean mayores.

Al igual que la resistencia a compresión, el módulo de la elasticidad disminuye con el aumento del porcentaje de áridos reciclados. Algunos autores como (Dhir R. K.; Limbachiya M. C.; Leelawat T. (1999) Dhir R. K.; Paine K. A. (2004) Limbachiya M. C.; Leelawat T.; Dhir R. K. (1998)) comentan que la sustitución de hasta 30% de áridos reciclados, tiene un efecto mínimo sobre los valores del módulo de elasticidad. Por otra parte, los autores (Frondistou-Yannas S. (1977) TFSCCS (2004). Xiao J. Z.; Li J.; Zhang C. (2005) Hansen T. C.; Boegh E. (1985)) comentan que utilizando hasta un 100% de áridos reciclados conlleva a una bajada del módulo de elasticidad del 20% hasta el 40%.

En cuanto a la relación resistencia a compresión y módulo elástico, los autores que hacen un estudio para el diseño del nuevo código modelo 2020 de la fib y el nuevo Eurocodigo 2, (N.Tošić, J.M. Torrenti, T. Sedran, I. Ignjatovic, (2020)), proponen para el cálculo del módulo de elasticidad la ecuación 1. Esta ecuación refleja el comportamiento de los áridos reciclados que debido a la adherencia del árido son más flexibles y una reducción en módulo de elasticidad, aunque la resistencia sea igual a la compresión sigue igual a los de áridos naturales.

$$E_{cm} = k_E \cdot (1 - (1 - 7100/k_E) \cdot \alpha_{RA}) \cdot f_{cm}^{1/3}$$

Ecuación 1: ecuación de módulo de elasticidad para hormigones de áridos reciclados. fuente: N.Tošić, J.M. Torrenti, T. Sedran, I. Ignjatovic, (2020).

Donde,

- $E_{cm}$  es el módulo de elasticidad.
- $k_E$  es el coeficiente de los áridos naturales en el hormigón.
- $\alpha_{RA}$  es la ratio de sustitución de áridos reciclado.
- $f_{cm}$  es la resistencia del hormigón.

### Resistencia a tracción

La resistencia a tracción es una propiedad importante de cara al diseño estructural en estado límite de servicio. Esta propiedad nos indica la capacidad del hormigón a tracción y por lo tanto afecta a la fisuración del hormigón.

Al igual que la resistencia a compresión y el módulo elástico, la resistencia a tracción también se ve afectada por la cantidad de áridos reciclados. R.A Silva (2015) concluye en su tesis que a medida que aumenta la cantidad de áridos reciclados en el hormigón, la resistencia a tracción se va disminuyendo.

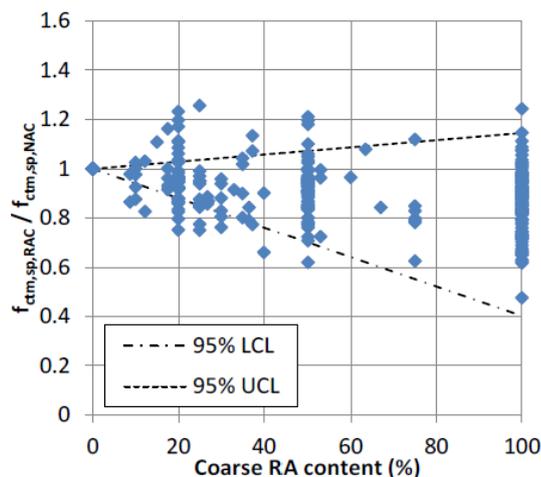


Figura 9: Influencia del incremento de áridos reciclado en la resistencia a tracción. Fuente: R.A. Silva (2015)

Como se puede observar en la figura 9, si el contenido de áridos reciclado en el hormigón es del 100% la resistencia a tracción puede llegar a disminuir 60%, comparado con los hormigones con áridos naturales. La línea de tendencia al 95% indica la disminución hasta 60%, aunque este puede hasta 40% si se miran los datos en la figura 9.

Como se ha visto, en general, si el contenido del árido reciclado es hasta 30%, los resultados cambian ligeramente, en cambio si la sustitución es mayor al 30%, los valores de las resistencias disminuyen gradualmente. Un incremento gradual en contenido de áridos reciclados en hormigón a partir del 30% implica, la disminución gradual en los valores de las resistencias. Por otra parte, la incorporación de áridos reciclados implica un factor adicional a parte de la resistencia a compresión, en el cálculo del módulo elástico.

## 2.4 Hormigón con fibras

La EHE-08 define a los hormigones reforzados con fibras (HRF) como aquellos que contiene en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa.

Los hormigones reforzados con fibras son reconocidos principalmente por la resistencia residual, es decir, la resistencia que ofrece el hormigón post rotura debido a las fibras. Este tipo de hormigones, aparte de que mejoran las propiedades mecánicas del hormigón, también mejoran la durabilidad del hormigón debido a capacidad de reducir el ancho de las fisuras.

Uno de los ensayos más utilizados para caracterizar el hormigón reforzado con fibras es el *3-point bending test* que sea realiza de acuerdo con la norma *EN 14651:2005*. El problema de este ensayo es que se realiza en elemento grandes, se podría decir se realiza en pequeñas vigas y se utiliza bastante material. Como alternativa a este ensayo, existen varios ensayos en elementos más compactos, como el ensayo de Barcelona, que se realiza de acuerdo con la normativa *UNE-83515:2010*. El ensayo Barcelona se realiza en probetas cilíndrica de d.150mmx150mm, que, sometida a doble punzonamiento, y permite la caracterización del hormigón a tracción con menor variación al resto de ensayos.

### 2.4.1 Propiedades del hormigón reforzado con fibras.

Como ya se ha comentado la principal característica de este tipo de hormigón es la resistencia residual. La resistencia residual, de alguna manera, muestra el comportamiento dúctil del hormigón. Esta propiedad se representa como en la figura 10.

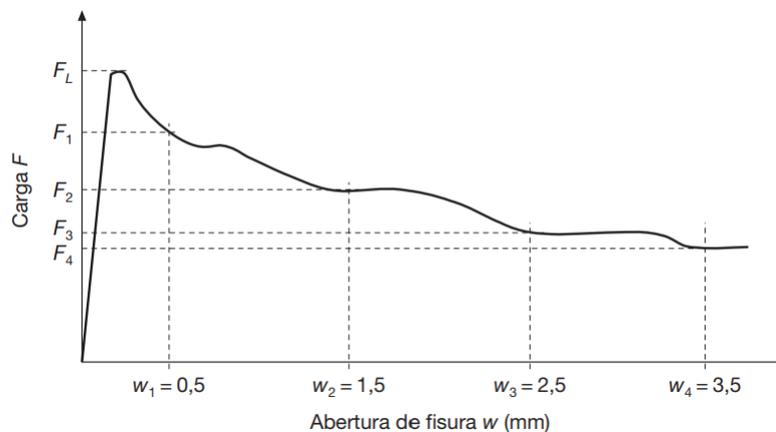


Figura 10: Resistencia residual: diagrama Carga-Apertura de fisuras. Fuente EHE-08 (anejo 14)

En cuanto a la **resistencia a compresión**, los autores *M.kunieda, N.Ueda, H.Nkamura, (2014)*, investigaron el comportamiento de hormigones reciclado con fibras y los resultados mostraron que, la resistencia a compresión disminuye ligeramente en los hormigones reforzados con fibras respecto a los sin fibras. Concluyeron que esta disminución podría ser debido al efecto vacío que generan las fibras, y también al aumento de aire debido a la adición de las fibras.

Por otra parte, la resistencia a tracción, al contrario que la resistencia a compresión aumenta ligeramente. Como se puede observar en la figura 11, en la medida que aumenta en contenido de fibras, aumenta no solo la resistencia a tracción, sino también la resistencia residual del hormigón. Se puede observar también la relación entre fibra metálica y de polipropileno, al tener un módulo elástico mayor las fibras metálicas presentan unas resistencias tracción mayores para el mismo volumen de fibras.

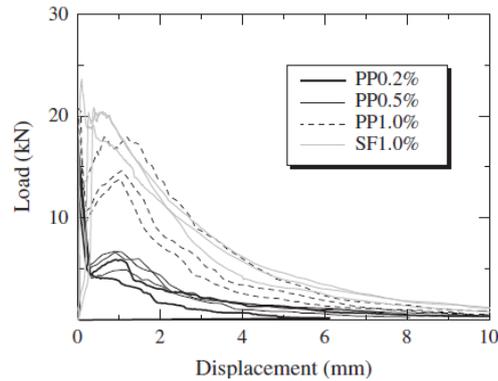


Figura 11: Diagrama Carga-desplazamiento de HRF ensayados a tracción. (edad 70 días). Fuente M.kunieda, N.Ueda, H.Nkamura, (2014), Ability of recycling on fiber reinforced concrete.

## 2.5 Comentarios y conclusiones:

El reciclaje o la valorización de los residuos procedentes de las actividades de construcción y demolición es uno de los retos más importantes que se enfrenta el sector de la construcción.

Como se ha visto en este capítulo, se han hecho diversos estudios sobre el uso de áridos reciclados. Se han hecho estudios satisfactorios sobre el uso de hormigones con 100% áridos reciclado, pero también observamos que la EHE-08 limita en 20% el uso de áridos reciclados en hormigones estructurales. Aunque utilizáramos el 100% de áridos reciclados en las nuevas construcciones, dentro de 30 o 50 años, cuando acabe la vida útil de las infraestructuras, surgirá otro problema, el uso de áridos multi reciclados. Debido a esto, es importante conocer los límites de materiales que están a nuestra disposición para darle un uso correcto y más eficiente, y que efecto lo menos posible nuestro medio ambiente. Para llegar al fondo de la cuestión y conocer los límites de los materiales y dar respuesta a las cuestiones/objetivos mencionados anteriormente, se procederá a realizar una campaña experimental, que se detalla en el capítulo 3.

Por otra parte, hay que destacar el uso de hormigón con fibras, que desde que se aceptó su uso estructural por la *Instrucción Española EHE-08*, es cada vez más utilizado. Pero los temas relacionados con la demolición y el posterior reciclado de este tipo de hormigones aun no se han abordado a fondo. La motivación de esta tesis es abordar los temas de reciclabilidad y reusabilidad del hormigón reforzado con fibras, estudiar la repuesta de estos tipos de hormigones sometidos a proceso de multi-reciclado y consecuentemente, dar respuesta a los objetivos mencionados en el capítulo 1.

## Capítulo 3

# 3. Campaña experimental

El presente capítulo tiene como objetivo exponer los objetivos de metodología que se ha llevado a cabo para realización de la campaña experimental.

En este capítulo se explicará entonces, tanto los materiales empleados (áridos, cemento etc.) como sus propiedades. También se expondrá los ensayos que se han llevado a cabo, tanto en estado fresco como endurecido.

El objetivo principal de este capítulo es describir los experimentos/pruebas que se han realizado en laboratorio durante la campaña experimental. Con la realización de dichos experimentos descubriremos el comportamiento de hormigones sometidos a varios ciclos de reciclaje, así como la influencia de las fibras estructurales añadidas.

### 3.1 Fases campaña experimental:

La campaña experimental consiste en, a partir de áridos naturales, fabricar 3 generaciones de hormigón. En cada generación se fabricarán 2 tipos de hormigones, una con fibras adicionales y otra sin fibras. Estos serán sometidos a diferentes ensayos tanto en estado fresco como en endurecido.

Una de las partes de importante de la campaña experimental será la caracterización de los áridos reciclados. Una vez fabricado el hormigón y ensayadas las probetas, estas son recicladas para la fabricación de las siguientes generaciones. Este proceso de reciclaje consta de trituración de las probetas y la posterior caracterización de los áridos mediante diferentes ensayos.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

La primera parte de la campaña experimental se trata de una prueba inicial. Esta parte es importante y necesaria para la viabilidad de la campaña estructural. Se Comprueba experimentalmente lo previsto teóricamente, y se sacan conclusiones desde dosificaciones (contenido de fibras, aditivos, etc.) hasta las técnicas a emplear en los procesos de reciclaje y saber las limitaciones del laboratorio.

Una vez acabada la prueba inicial, se procede a definir el plan para llevar a cabo la investigación.

Como se ha explicado anteriormente, la campaña experimental consta de un primer parte de prueba inicial y, otra de fabricación de 3 generaciones de hormigón.

La primera generación es fabricada a partir de áridos naturales y consta de 2 tipos de hormigones; uno con fibra y otro sin fibras. A partir del reciclaje de cada tipo de hormigón se fabricarán otras 2 generaciones; uno con fibra adicionales y otro sin fibras adicionales. Y así hasta llegar hasta la generación 3. Esto se explica en la figura 12.

Hay que tener en cuenta que, aunque el árido proveniente de hormigones con fibras lleve una cantidad de fibras, si los hormigones a fabricar no se le añade fibra serán considerado hormigón sin fibras.

Debido a la cantidad de finos y mortero, el árido fino será sustituido por árido natural mientras que el árido grueso será siempre 100% reciclado.

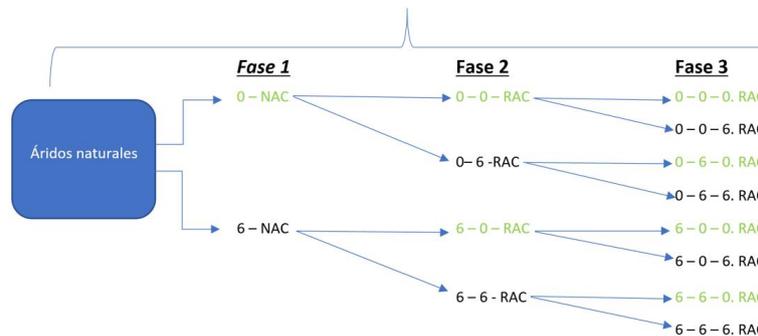


Figura 12: fases de la campaña experimental.

### 3.2 Plan de la campaña experimental

El objetivo de este apartado es describir todas las fases de la campaña experimental, desde la preparación de las dosificaciones pasando por la caracterización de los áridos hasta la fabricación, ensayos y reciclaje de las probetas.

#### Caracterización de áridos y fabricación de hormigón de referencia

La primera fase de la campaña experimental es la caracterización de los áridos disponible en el laboratorio (LATEM) de la UPC. Se trata de caracterizar el árido mediante diferentes ensayos;

- Absorción de agua
- Densidad
- Ensayos de granulometría y contenido de finos.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Una vez determinadas las características del hormigón se procede al diseño de un hormigón de referencia. El objetivo de este hormigón es hacer la comprobación y/o estudiar el comportamiento para saber si se necesita hacer algún cambio. Ya sea respecto a las dosificaciones, fabricación o las técnicas a emplear para el reciclaje del hormigón.

### Generación I

Después de realizar las tareas preliminares, se procederá a la fabricación de la primera generación. Se trata de fabricar 2 tipos de hormigones a partir de áridos naturales; uno sin fibras (0 – NAC) y otro con fibras de polipropileno de 6 kg/m<sup>3</sup> de contenido (6 – NAC). De cada tipo de hormigón se fabricarán las siguiente tipo y cantidad de probetas.

Tipo de hormigón	Tipos de ensayos						observaciones
	Compresión		Tracción		Módulo de elasticidad	Barcelona	
	@ 7 días	@ 28 días	@ 7 días	@ 28 días	@ 7 y 28 días	@ 28 días	
	Ø 150x300mm					Ø 150x150mm	
	Numero de probetas						(*) la misma probeta ensayada tanto a 7 como a 28 días.
0 – NAC	3	3	3	3	3*	6	
6 – NAC	3	3	3	3	3*	6	

Tabla 2: Campaña experimental Generación I.

### Reciclaje árido procedente de 0 – NAC y 6 – NAC

Una vez fabricado el hormigón de la generación I y ensayada las probetas, se procede a reciclaje de y caracterización del árido grueso. Las tareas para realizar son:

- Trituración de las probetas: obtención de áridos reciclados RA.
- Separación de áridos en fracciones: 4-12mm y 12-20mm. (tanto el árido fino < 4mm y >20mm, no se recicla.
- Gradación de áridos.
- Realizar ensayos de absorción a 1h y 24h.
- Ensayo para la densidad de árido.
- Contenido de fibra en áridos procedente de 6 – NAC.

### Generación II

Después de realizar las tareas de reciclaje y caracterización de árido reciclado, se procederá a la fabricación de la generación II.

Similar a la generación anterior, Se fabricarán 2 tipos de hormigones con cada tipo de árido reciclado: RA – 0 (árido reciclado de hormigón sin contenido de fibras) y RA – 6 (árido reciclado de hormigón con 6kg/m<sup>3</sup> contenido de fibras).

Con cada tipo de áridos mencionados anteriormente se fabricarán 2 tipos de hormigones; uno sin fibras en la generación II y otro con fibras de polipropileno de 6 kg/m<sup>3</sup> de contenido en la generación II.

Por lo tanto, de RCA – 0, se fabricarán las siguientes mezclas:

- 0 – 0. RAC: hormigón sin fibras, con árido reciclado y sin fibras en generación anterior.
- 0 – 6. RAC: hormigón con contenido de fibras de 6 kg/m<sup>3</sup>, con árido reciclado y sin fibras en generación anterior.

Y a partir de RCA – 6, se fabricarán:

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

- 6 – 0. RAC: hormigón sin fibras, con árido reciclado con fibras en generación anterior.
- 6 – 6. RAC: hormigón con contenido de fibras de  $6 \text{ kg/m}^3$ , con árido reciclado con fibras en generación anterior.

De cada tipo de hormigón se fabricarán las siguiente tipo y cantidad de probetas.

Tipo de hormigón	Tipos de ensayos						observaciones
	Compresión		Tracción		Módulo de elasticidad	Barcelona	
	@ 7 días	@ 28 días	@ 7 días	@ 28 días	@ 7 y 28 días	@ 28 días	
	Ø 150x300mm					Ø 150x150mm	
	Numero de probetas						(*) la misma probeta ensayada tanto a 7 como a 28 días.
0 – 0 RAC	3 + 3 <sup>(a)</sup>	3 + 3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(*)</sup>	6	(a) Probetas cilíndricas de Ø100x200mm.
6 – 6 RAC	3 + 3 <sup>(a)</sup>	3 + 3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(*)</sup>	6	
6 – 0 RAC	3 <sup>(a)</sup>	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(*)</sup>	6	(b) las mismas probetas usadas para el módulo.
6 – 6 RAC	3 <sup>(a)</sup>	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(*)</sup>	6	

Tabla 3: Campaña experimental. Generación II.

### Reciclaje árido procedente de 0 – 0. RAC, 0 – 6. RAC, 6 – 0. RAC y, 6 – 6. RAC

Se hace el mismo procedimiento que el reciclaje de la generación anterior, solo que esta vez, como el árido procede de 4 tipos de hormigón, n habrá cuatro tipos de áridos distintos. Y por lo tanto el proceso será más largo. Las tareas para realizar son las misma a las de reciclaje de generación anterior:

- Trituración de las probetas: obtención de áridos reciclados RA.
- Separación de áridos en fracciones: 4-12mm y 12-20mm. (tanto el árido fino < 4mm y >20mm, no se recicla.
- Gradación de áridos.
- Realizar ensayos de absorción a 1h y 24h.
- Ensayo para la densidad de árido.
- Contenido de fibra en áridos.

### Generación III

Después de realizar las tareas de reciclaje y caracterización de árido reciclado, se procederá a la fabricación de la primera generación.

Se procederá de la misma manera que en las generaciones anteriores, Se fabricarán 2 tipos de hormigones con cada tipo de árido reciclado:

- RA – 0 – 0 (árido reciclado de hormigón sin contenido de fibras en ninguna de las generaciones anteriores)
- RA – 0 – 6 (árido reciclado de hormigón con  $6 \text{ kg/m}^3$  contenido de fibras en la generación II).
- RA – 6 – 0 (árido reciclado de hormigón con  $6 \text{ kg/m}^3$  contenido de fibras en la generación I)
- RA – 6 – 6 (árido reciclado de hormigón con  $6 \text{ kg/m}^3$  contenido de fibras en la generación I y en la generación II).

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Con cada tipo de áridos mencionados anteriormente se fabricarán 2 tipos de hormigones; uno sin fibras en la generación III y otro con fibras de polipropileno de  $6 \text{ kg/m}^3$  de contenido en la generación III.

Por lo tanto, de RA – 0 – 0, se fabricarán las siguientes mezclas:

- 0 – 0 – 0. RAC: hormigón sin fibras, con árido reciclado y sin fibras en ninguna de las generaciones anteriores.
- 0 – 0 – 6. RAC: hormigón con contenido de fibras de  $6 \text{ kg/m}^3$ , con árido reciclado y sin fibras en ninguna de las generaciones anteriores.

A partir de RA – 0 – 6, se fabricarán:

- 0 – 6 – 0. RAC: hormigón sin fibras, con árido reciclado con fibras en generación II.
- 0 – 6 – 6. RAC: hormigón con contenido de fibras de  $6 \text{ kg/m}^3$ , con árido reciclado con fibras en generación II.

A partir de RA – 6 – 0, se fabricarán:

- 6 – 0 – 0. RAC: hormigón sin fibras, con árido reciclado con fibras en generación I.
- 6 – 0 – 6. RAC: hormigón con contenido de fibras de  $6 \text{ kg/m}^3$ , con árido reciclado con fibras en generación I.

Y por último, a partir de RA – 6 – 6, se fabricarán las siguientes mezclas:

- 6 – 6 – 0. RAC: hormigón sin fibras, con árido reciclado y con fibras en todas las generaciones anteriores.
- 6 – 6 – 6. RAC: hormigón con contenido de fibras de  $6 \text{ kg/m}^3$ , con árido reciclado y con fibras en todas las generaciones anteriores.

De cada tipo de hormigón se fabricarán las siguiente tipo y cantidad de probetas.

Tipo de hormigón	Tipos de ensayos							observaciones
	Compresión		Tracción		Módulo de elasticidad		Barcelona	
	@ 7 días	@ 28 días	@ 7 días	@ 28 días	@ 7 y 28 días		@ 28 días	
	Ø 150x300mm					Ø 150x150mm		
Numero de probetas								
0 – 0 – 0 RAC	3 <sup>(a)</sup>	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(**)</sup>		6	(**) la misma probeta ensayada tanto a 7 como a 28 días. Y Probetas cilíndricas de Ø100x200mm.  (a) Probetas cilíndricas de Ø100x200mm.  (b) las mismas probetas usadas para el módulo.  (a) Probetas cilíndricas de Ø100x200mm. Y las mismas probetas usadas para la resistencia a compresión.
0 – 0 – 6 RAC	3 <sup>(a)</sup>	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(**)</sup>		6	
0 – 6 – 0 RAC	3 <sup>(a)</sup>	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(**)</sup>		6	
0 – 6 – 6 RAC	3 <sup>(a)</sup>	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	3 <sup>(**)</sup>		6	
6 – 0 – 0 RAC	-	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	-	3 <sup>(a)</sup>	6	
6 – 0 – 6 RAC	-	3 <sup>(a)</sup>	-	3 <sup>(b)</sup>	-	3 <sup>(a)</sup>	6	
6 – 6 – 0 RAC	-	3 <sup>(a)</sup>	-	-	-	3 <sup>(c)</sup>	6	
6 – 6 – 6 RAC	-	3 <sup>(a)</sup>	-	-	-	3 <sup>(c)</sup>	6	

Tabla 4: Campaña experimental. Generación III.

### 3.3 Materiales empleados:

El objetivo de este apartado es describir los materiales que se han empleado, así como sus características técnicas. A continuación, se detallan los materiales.

#### 3.3.1 Cemento:

Para la fabricación de los hormigones solo se ha empleado un tipo de cemento. El **CEM II/A-L 42,5R**, proporcionado por “Ciments Molins”, y el único disponible en Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales “Lluís Agulló” (LATEM).

#### 3.3.2 Aditivos:

Debido a conseguir un hormigón trabajable, el uso de plastificantes acaba siendo necesario, ya sea a menor y/o mayor medida, en los 2 tipos de hormigones se fabricarán; hormigones sin fibras y hormigones con fibras. Mediante los plastificantes conseguimos mantener la misma relación a/c y al mismo tiempo conseguimos un hormigón más fluido/trabajable.

La adición de las fibras hace que, con la misma cantidad de agua el hormigón sea menos fluido/trabajable que un hormigón sin fibras. Luego, es necesario el uso de plastificante para conseguir la misma consistencia a un hormigón sin fibras.

El tipo de plastificante que se va a utilizar para la realización de la campaña experimental es MÁSTER POZZOLITH 7003

#### 3.3.3 Fibras sintéticas:

Las fibras utilizadas en la campaña experimental son proporcionadas por la compañía “Master Builder Solution de MBCC group.” son Fibra de polipropileno monofilamento, transparentes resistente a los álcalis y destinada al refuerzo estructural de hormigón y productos derivados del cemento.

Las fibras que se van a utilizar tienen una densidad de 0.91g/cm<sup>3</sup>, un diámetro de 0,85mm y una longitud de 48mm.

#### 3.3.4 Áridos:

Los áridos empleados para llevar a cabo la campaña experimental han sido, por un lado, áridos naturales para la fabricación de la fase 1. Y por otro lado, áridos reciclados, procedente de la demolición y trituración de las probetas ensayadas de la fase 1.

##### 3.3.4.1 Áridos naturales:

Para la fabricación de la primera fase de la campaña experimental se han utilizado áridos naturales. Estos áridos han sido proporcionado por el laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales “Lluís Agulló” (LATEM).

La caracterización de estos áridos es necesario para la dosificación y posterior fabricación del hormigón. La caracterización de las propiedades geométricas de estos áridos se ha hecho mediante el ensayo de granulometría y de acuerdo con la normativa UNE-EN 933-1.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

El ensayo de granulometría consiste en dividir y separar el material mediante una serie de tamices en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. La masa de las partículas retenidas en los diferentes tamices se expresa respecto a la masa inicial del material.

A continuación, se presentan las propiedades de estos áridos obtenidas mediante el ensayo granulométrico.

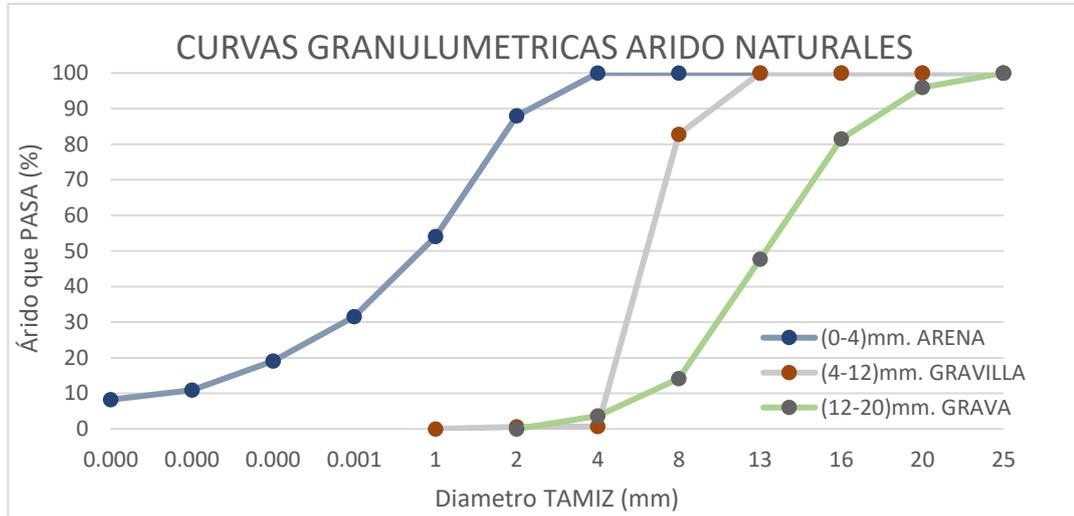


Gráfico 1: Curvas granulométricas de áridos naturales. (0-4mm arena, 4-12mm Gravilla, 12-20mm Gravas)

### 3.3.4.2 Áridos reciclados:

Como se ha comentado anteriormente, los áridos reciclados son procedente de la demolición/trituración de las probetas, una vez ensayadas.

Los áridos reciclados se emplean para la fabricación de la generación II y III. Para la fabricación de hormigones de generación II, los áridos son procedentes de las probetas de generación I y, por lo tanto, con solo un ciclo de reciclaje. Para la fabricación de la generación III, los áridos son procedentes de las probetas trituradas de generación II y, por lo tanto, con 2 ciclos de reciclajes.

A continuación, se muestra gráficamente los ciclos de reciclajes.

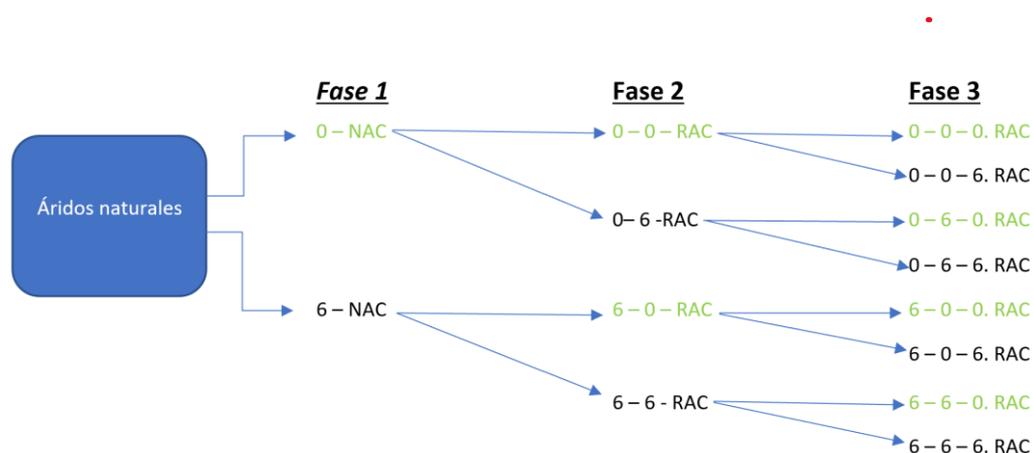


Figura 13: Fases de la campaña experimental.

Como podemos ver en la figura 13, la procedencia de los áridos reciclados y los hormigones para fabricar con los áridos comentados son los siguientes:

**Fabricación de hormigones de generación II:**

- Procedencia áridos:
  - 0 – NAC: Árido procedente de hormigón con áridos naturales sin adición de fibras.
  - 6 – NAC: Árido procedente de hormigón con áridos naturales y con fibras.

**Fabricación de hormigones de generación III:**

- Procedencia áridos:
  - 0 – 0 – RAC: Árido procedente de hormigón de áridos reciclado (Generación II) sin adición de fibras en ninguna de las generaciones anteriores.
  - 0 – 6 – RAC: Árido procedente de hormigón de áridos reciclado (Generación II) y con adición de fibras en la generación II.
  - 6 – 0 – RAC: Árido procedente de hormigón de áridos reciclado (Generación II) y con adición de fibras en la generación I.
  - 6 – 6 – RAC: Árido procedente de hormigón de áridos reciclado (Generación II) y con adición de fibras en la generación I y II.

**3.4 Dosificaciones y fabricación del hormigón.**

El objetivo es la fabricación de mezclas con una resistencia de compresión de  $f_{cm} = 35$  MPa, y un asentamiento de cono de abra de  $S = 125 \pm 25$ mm.

Desde el punto de vista de los áridos, se tomó la decisión de sustituir 100% solamente el árido grueso (4/12 gravilla y 12/20 grava). Mientras que el árido fino (0/4 arena) sería, en todas las generaciones de origen natural.

El plan de la campaña experimental se realizó desde el principio del mes de marzo hasta finales de julio. en el laboratorio de tecnología de estructuras y materiales “Lluís Agullo” (LATEM) de la UPC, en Barcelona.

Las dosificaciones de las mezclas, el número y tipo de probetas iban cambiando según se avanzaba a la siguiente generación. Esto se debe a la disponibilidad de la cantidad de material reciclado (árido grueso).

A continuación, se detallan las dosificaciones para cada generación.

**Generación I**

En la generación I se fabricarán 2 tipos de hormigones; uno con fibra y otro sin fibras. Dado que la mezcladora (capacidad 35 l) que se utilizara no tiene capacidad para fabricar en una amasada el total de hormigón a fabricar, se hará en 4 amasadas de 30 l para cada tipo.

DOSIFICACIÓN PARA 1 m <sup>3</sup> DE MEZCLA											
Tipo de hormigón	Agua [kg/m <sup>3</sup> ]	Agua (absorción áridos) [kg/m <sup>3</sup> ]	Áridos Naturales			Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	plastificante [kg/m <sup>3</sup> ]	(a/c) <sub>eff</sub>	fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	V <sub>aire</sub> [%]	V (L)
			ARENA [0/4]	GRAVILLA [4/12]	GRAVA [12/20]						
0-NAC	175,0	21,38	816,07	272,02	725,39	350,0	1,400	0,500	0,000	0,020	1000
6-NAC	175,0	20,87	796,46	265,49	707,97	350,0	2,695	0,500	6,000	0,030	1000

Tabla 5: Dosificación de los hormigones de la generación I.

### Generación II

DOSIFICACIÓN PARA 1 m <sup>3</sup> DE MEZCLA											
Tipo de hormigón	Agua [kg/m <sup>3</sup> ]	Agua (absorción áridos) [kg/m <sup>3</sup> ]	Áridos Naturales	Áridos reciclados		Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	plastificante [kg/m <sup>3</sup> ]	(a/c) <sub>eff</sub>	fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	V <sub>aire</sub> [%]	V (L)
			ARENA [0/4]	GRAVILLA [4/12]	GRAVA [12/20]						
0-0-RAC	175,0	68,79	673,79	539,04	471,66	350,0	0,000	0,500	0,000	0,020	1000
0-6-RAC	175,0	67,14	657,61	526,09	460,33	350,0	1,400	0,500	6,000	0,030	1000
6-0-RAC	175,0	62,50	677,90	542,32	474,53	350,0	0,000	0,500	0,000	0,020	1000
6-6-RAC	175,0	60,99	661,62	529,30	463,13	350,0	1,400	0,500	6,000	0,030	1000

Tabla 6: Dosificación de los hormigones de la generación II.

### Generación III

DOSIFICACIÓN PARA 1 m <sup>3</sup> DE MEZCLA											
Tipo de hormigón	Agua [kg/m <sup>3</sup> ]	Agua (absorción áridos) [kg/m <sup>3</sup> ]	Áridos Naturales	Áridos reciclados		Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	plastificante [kg/m <sup>3</sup> ]	(a/c) <sub>eff</sub>	fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	V <sub>aire</sub> [%]	V (L)
			ARENA [0/4]	GRAVILLA [4/12]	GRAVA [12/20]						
0-0-0-RAC	175,0	99,61	643,04	514,43	450,13	350,0	0,000	0,500	0,000	0,020	1000
0-0-6-RAC	175,0	97,21	627,60	502,08	439,32	350,0	0,000	0,500	6,000	0,030	1000
0-6-0-RAC	175,0	98,91	640,60	512,48	448,42	350,0	0,000	0,500	0,000	0,020	1000
0-6-6-RAC	175,0	96,54	625,21	500,17	437,65	350,0	0,000	0,500	6,000	0,030	1000
6-0-0-RAC	175,0	91,81	649,20	568,05	405,75	350,0	0,000	0,500	0,000	0,020	1000
6-0-6-RAC	175,0	89,60	633,61	554,41	396,01	350,0	0,000	0,500	6,000	0,030	1000
6-6-0-RAC	175,0	90,36	644,48	644,48	322,24	350,0	0,000	0,500	0,000	0,020	1000
6-6-6-RAC	175,0	88,19	629,00	629,00	314,50	350,0	0,000	0,500	6,000	0,030	1000

Tabla 7: Dosificación de los hormigones de la generación III.

## 3.5 Proceso de fabricación

La fabricación del hormigón y la preparación de las probetas se llevó a cabo en el laboratorio (LATEM) de la UPC, con las herramientas disponibles en dicho laboratorio.

Para fabricar las mezclas de hormigón se utilizó una mezcladora de unos 35 litros de capacidad. Se utilizaron, dependiendo del material a pesar, básculas con capacidad de 150kg con una precisión de 50g y 15kg con una precisión de 0,5g.

Debido a la capacidad de la mezcladora, no se podía hacer la mezcla de un tipo de hormigón en una sola vez sino en varias amasadas, por lo que se utilizó un mismo criterio para normalizar el proceso y evitar anomalías.

Para empezar con el proceso de fabricación, en primer lugar, se pesan todos los componentes de cada amasada (áridos, agua, cemento, fibras, aditivos)

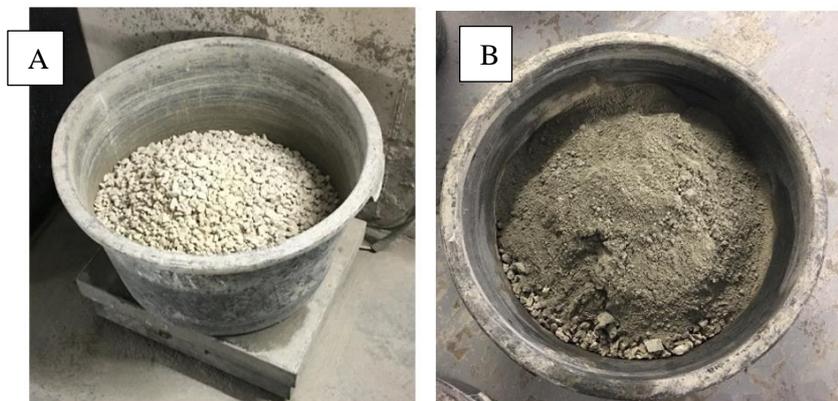


Figura 14: pesaje de los materiales; (A) Áridos (B) Áridos + cemento.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Después de preparar el material se procede a hacer la fabricación. En primer lugar, se mezclan los áridos en seco para que la mezcla sea lo más homogénea posible. Este proceso unos 2 min aproximadamente.



Figura 15: Mezcla de áridos secos en la mezcladora.

Una vez mezclados los materiales, se procede a la adición de agua. El agua se añade en pequeñas cantidades mientras la mezcladora está en funcionamiento y lo va mezclando. Este proceso dura unos 4 minutos aproximadamente.



Figura 16: Fabricación de hormigón.

Una vez terminado el proceso de adición de agua se procede a l siguiente paso. la adición de las fibras en caso de que proceda. Se añade fibras al hormigón y se procede a mezclar otra vez los materiales.



Figura 17: Adición de fibra en la mezcla; (A) fibras añadidas (B) fibras añadidas y mezcladas.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Una vez terminado el proceso de fabricación de la mezcla se procede a verificar la consistencia del hormigón. Si no está dentro del rango previsto, se añade plastificante (en caso de que sea más dura), de lo contrario, se mezcla el material durante unos 30s y se procede a rellenar probetas.



Figura 18: Diferentes procesos en la fabricación del hormigón: (A) Ensayo cono de Abraham en hormigón convencional. (B) Ensayo cono de Abraham en hormigón con fibras. (C) Relleno de probetas. (D) desmolde de probetas. (E) curado de probetas en la Cámara húmeda.

### 3.6 Descripción de las probetas

En la campaña experimental se utilizaron 3 tipos de probetas, todas cilíndricas.

#### Probetas cilíndricas Ø150/300 y Ø100/200:

Para los 3 tipos de ensayos, ensayo de compresión, tracción y módulo de elasticidad, se han utilizado las probetas Ø150/300, pero como se ha comentado anteriormente, a medida que ha ido avanzando la campaña experimental y debido a la reducción del material reciclado, se han tenido que utilizar las probetas Ø100/200 para así llevar a cabo todos los ensayos necesarios.

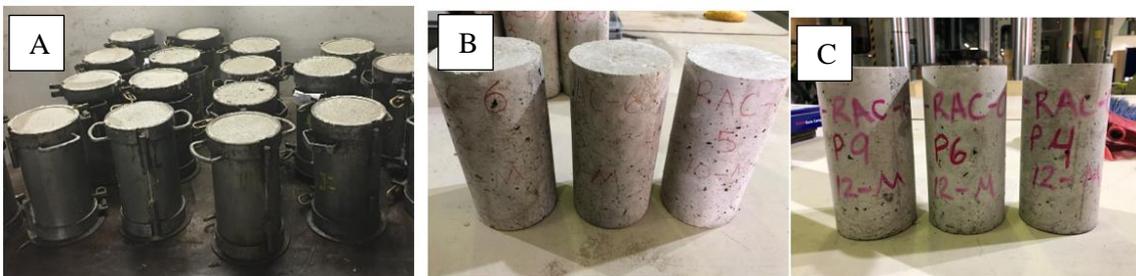


Figura 19: Probetas cilíndricas de Ø150/300 (A) y (B) y Ø100/200 (C).

#### Probetas cilíndricas Ø150/150:

Las probetas Ø150/150, se han utilizado para calcular la resistencia residual del hormigón mediante ensayo Barcelona.



Figura 20: Probetas cilíndricas de Ø150/150

### 3.7 Métodos empleados:

Para la caracterización, tanto de los áridos como del hormigón, se han empleado varios métodos. Estos se describen a continuación.

#### 3.7.1 Caracterización y obtención de áridos:

##### Áridos naturales:

Los áridos naturales utilizados en la presente campaña experimental son: arena (0/4), gravilla (4/12) y grava (12/20). Se utilizaron los siguientes métodos para caracterizar estos materiales.

##### Áridos reciclados:

Los áridos reciclados son procedentes del machaqueo de las probetas fabricadas y ensayadas anteriormente. Los tipos de áridos reciclado y utilizados son: gravilla (4/12) y grava (12/20).

La caracterización del RCA (recycle concrete aggregates) se ha llevado a cabo en el laboratorio de la UPC. En este proceso se han estudiado diferentes propiedades de los áridos y se utilizaron los siguientes métodos para la obtención de cada tipo de propiedad.



Figura 21: Proceso de reciclaje de las probetas: partición de las probetas en 2. (B) trituradora (C) trituración de las probetas. (D y E) obtención de árido reciclado.

### 3.7.2 Contenido de fibras:

Para estudiar cada tipo de propiedad, se han triturado las probetas y se anotaron el peso del material obtenido y se calculó el perdido durante el proceso de machaqueo.

El contenido de fibras es la primera propiedad en estudiar ya que el material no se ha separado por tamaño y por lo tanto es más preciso.

El primer paso es cuartear el árido para tener una muestra lo más homogénea posible. Después se coge una muestra y se sumerge en el agua. Y por flotación se recogen las fibras sueltas/flotantes. Se recogen las fibras flotantes, se secan en un horno durante 24h y se pesan. Se aplica el resultado al peso total del material. La **técnica de flotación** se ha utilizado para saber la cuantía de fibras sueltas.



Figura 22: Obtención del contenido de fibras: (A) colección de fibras mediante flotación, (B) secado de fibras en el horno, (C) fibras secas post horneado.

Otra de las técnicas utilizadas para saber la cuantía de las fibras libres ha sido **la técnica de separación manual**. Consiste en contar manualmente, en una muestra de áridos, las fibras sueltas en el árido. Se pesan las fibras las fibras y se calcula la cuantía de fibras sueltas.

Por otro lado, aparte de fibras sueltas, los áridos reciclados contenían **fibras adheridas al árido** por el efecto de mortero adherido. Para saber la cuantía de fibras adheridas al áridos o fibras incrustadas, se ha utilizado el **método de quema o incineración**. Este método consiste en coger una muestra del material y ponerla en horno a una temperatura de descomposición (220°C) de las fibras, durante 24h. la cuantía de fibra en este caso sería el peso inicial menos el peso final después de la composición.



Figura 23: Obtención contenido de fibras mediante el método de quema o incineración de fibras para las fibras incrustadas. (A) y (B) áridos reciclados con fibras antes de la quema de 4/12 mm y 12/20 mm, respectivamente. (C) y (D) áridos reciclados con fibras después de la quema de 4/12 mm y 12/20 mm, respectivamente. (E) áridos en el horno para la quema.

Otra de las técnicas utilizadas para saber la cuantía de las fibras incrustadas ha sido la **técnica de canteo manual**. Consiste en contar manualmente, en una muestra de áridos, las fibras sueltas en el árido. Sabiendo la cantidad de fibras sueltas en una fracción y sabiendo la frecuencia de las fibras (41200 ud/kg), dato obtenido de la ficha técnica, se calcula la cuantía de fibra en árido. (kg de fibras en kg de árido (kg/kg))

#### **Contenido de finos, absorción, densidad y granulometría:**

Una vez obtenido el contenido de fibras, se procede a separar el árido en 4 fracciones; 0/4, 4/12, 12/20 y 20+. Dado que los áridos reciclado a utilizar son áridos gruesos y fracciones 4/12 y 12/20, se eliminan las fracciones 0/4 (aportación arena natural) y 20+.

Este proceso se ha hecho manualmente mediante tamices de 4, 12 y 20 mm. Cabe destacar que los áridos 20+ eran áridos pequeños pero sujetos mediante fibras que hacía imposible que pasasen el tamiz 20mm.

Una vez separados los áridos, estos se cuarteo hasta obtener unas muestras de 1-2 kg de cada tipo.



Figura 24: Cuarteo de áridos para muestras representativas.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Las muestras de pesan (masa inicial), se lavan en recipiente metálico y se filtran los finos y agua. Se pone el material en una bandeja, que es puesta durante 24h en un horno para que se seque.

Una vez seco el material se pesa (masa final), y la diferencia entre la masa inicial y la final es el **contenido de finos**.



Figura 25: Obtención del contenido de finos. (A) recipiente metálico de filtración. (B, C) Lavado de árido. (D) muestra final post lavado.

Una vez calculado el contenido de finos, con las mismas muestras procedemos a la **granulometría**.

Para las muestras 4/12 se escogen los tamices 1, 2, 4, 5, 8, 12.5 y para las 12/20 se cogen los tamices 4, 6.3, 8, 12.5, 16, 20, 25 y se procede a realizar el ensayo de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1:2012 y UNE-EN 933-2/1M:1999.

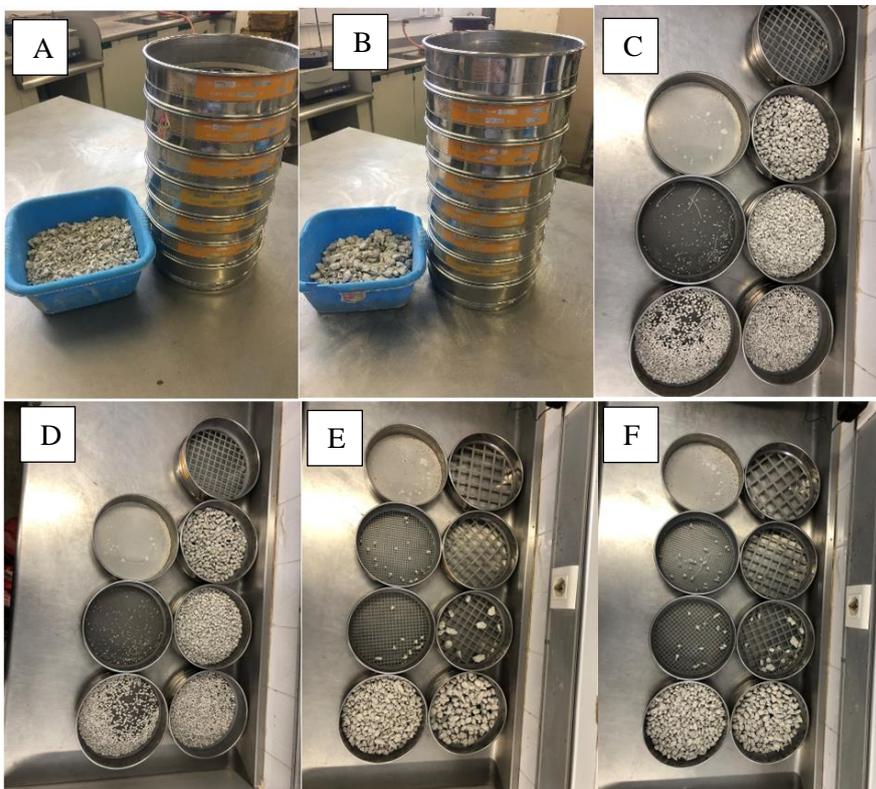


Figura 26: Obtención de la granulometría. (A) Tamizaje árido 4/12 mm (B) tamizaje árido (12/20). (C) resultado final de la granulometría del árido 4/12 con fibras. (D) resultado final de la granulometría del árido 4/12 sin fibras. (E) resultado final de la granulometría del árido 12/20 sin fibras. (F) resultado final de la granulometría del árido 12/20 con fibras

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Para la **absorción y la densidad** se cogen otras muestras, se lavan en recipiente para eliminar finos. Se sumerge el árido en agua en recipientes durante 1h o 24h, dependiendo de la absorción que se quiera calcular. Se coge el árido y se pesa mediante la báscula hidrostática y se anota la masa (M1), se quita el material y solo se pesa el recipiente sumergido en el agua y se anota la masa(M2). Después se seca la superficie del material con toallas/telas/trapos y anota la masa(M3). Finalmente se seca el material durante 24h en un horno y se anota la masa (M4). Una vez obtenidos todos estos datos, se procede a calcular las diferentes propiedades con las ecuaciones estandarizadas y de acuerdo con la normativa UNE-EN 1097-6:2014.

$$\text{Densidad aparente de partículas} \quad \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (1)$$

$$\text{Densidad de partículas secadas en estufa} \quad \rho_{fd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (2)$$

$$\text{Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente} \quad \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3)$$

y la absorción de agua después de la inmersión durante 24 h,  $WA_{24}$ , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (4)$$

Figura 27: Ecuaciones para obtener la densidad y absorción.

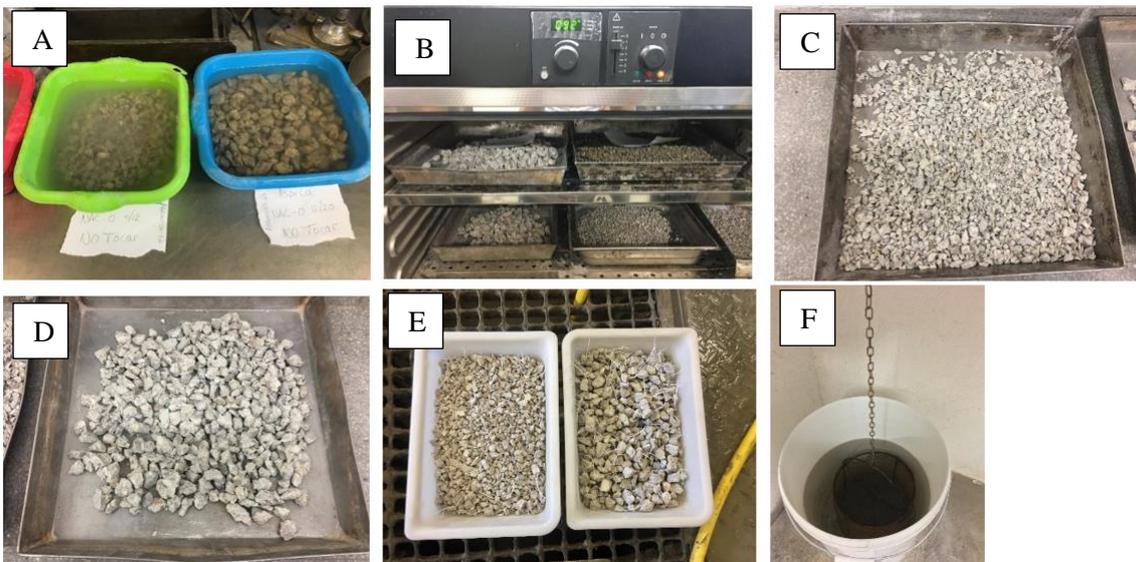


Figura 28: Proceso de obtención de absorción y densidades. (A) sumergido de árido en agua (B) secado del árido en horno a 100°C (C) árido post secado (4/12mm) (D) árido post secado (12/20mm) (E) muestras del árido 4/12mm y 12/20mm (F) medición del peso en la balanza hidrostática.

### 3.8 Caracterización hormigón

#### 3.8.1 Estado Fresco

##### Consistencia

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Para verificar la consistencia del hormigón se ha empleado el ensayo del cono de Abraham. El ensayo se ha realizado en todas las amasadas del hormigón y de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-2:2020

El ensayo consiste en rellenar con hormigón fresco un molde troncocónico de 30 cm de altura. La disminución de la altura que se produce cuando se desmolda la mezcla, es la medida que define la consistencia.



Figura 29: Realización del ensayo de cono de Abraham.

Los hormigones se clasifican por su consistencia según se indica en la siguiente tabla:

Consistencia	Asiento en Cono de Abrams (cm)
Seca	0 - 2
Plástica	3 - 5
Blanda	6 - 9
Fluida	10 - 15
Líquida	16 - 20

Tabla 8: Clase de consistencia del hormigón según el asiento. fuente EHE-08.

### 3.8.2 Estado Endurecido:

Ensayos	Normativa
Ensayo de compresión	UNE-EN 12390-3:2020
Ensayo de tracción indirecta o brasileño	UNE-EN 12390-6:2010.
Módulo de elasticidad	UNE-EN 12390-13:2014
Ensayo de Barcelona o resistencia residual	UNE 83515:2010

Tabla 9: tipos de ensayos y las normativas correspondientes.

#### Ensayo de compresión

La resistencia a compresión se obtiene mediante el ensayo de compresión. Este ensayo se ha realizado en probetas, o a los 7 días del curado o a los 28 días. El ensayo se ha realizado de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-3:2020. La carga de aplicación va incrementando a velocidad constante, e igual a 0,5 MPa/s, hasta llegar a la rotura.

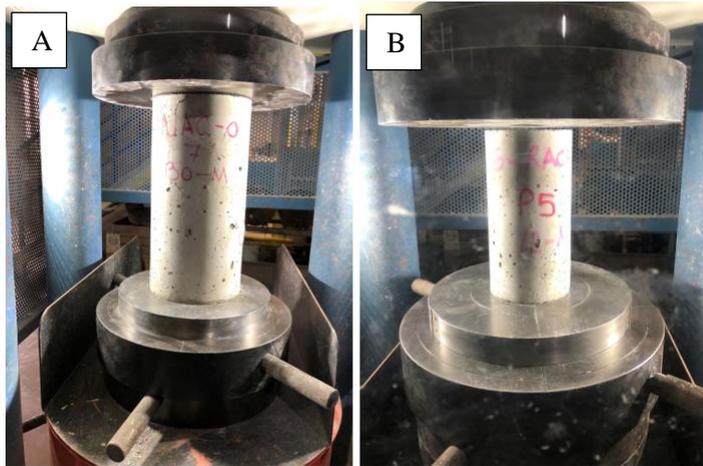


Figura 30: ensayo de probetas a compresión. (A) probeta Ø150/300 (B) probeta Ø100/200

la realización del ensayo se hace en varias fases.

Primero, las probetas se han de pulir para tenga una superficie plana y evitar así errores a la hora de ensayar.

Después de pulir las probetas, se toman las medidas y se pesan.

Una vez hechos los pasos previos, se procede a ensayar la probeta.

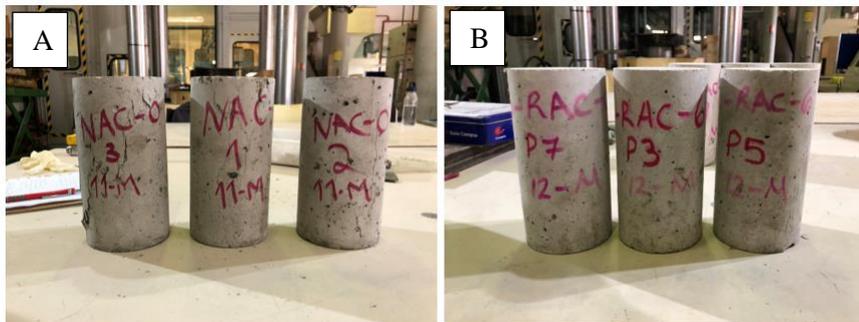


Figura 31: Aspecto de probetas post ensayo de compresión (A) probeta Ø150/300 (B) probeta Ø100/200.

### Ensayo de tracción indirecta o brasileño:

El ensayo brasileño consiste en aplicar una carga externa de compresión en el eje longitudinal de la muestra cilíndrica, mientras que el extremo opuesto a la carga permanece apoyado. De esta forma aparecen dos fuerzas diametralmente opuestas que producen una distribución uniforme de tracciones transversales a lo largo del eje de carga, causando la rotura a tracción de la muestra.

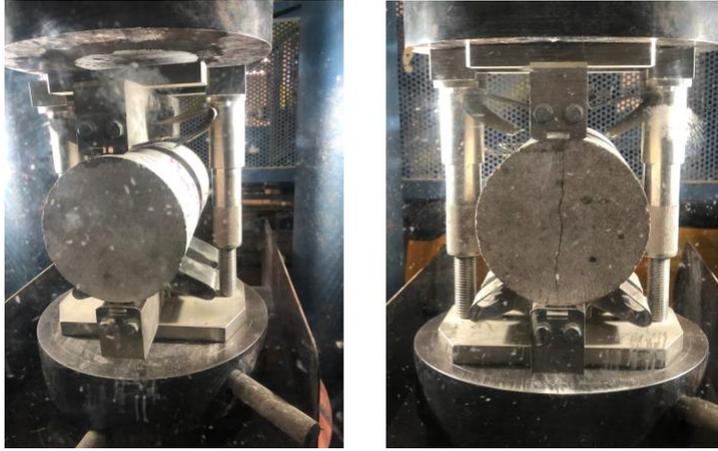


Figura 32: Realización del ensayo a tracción indirecta o brasileño.

El ensayo se ha realizado de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-6:2010. La velocidad de carga en este caso es de 3,5 kN/s. el ensayo se ha realizado tanto a 7 días como 28 días del curado en la generación I. En las generaciones II y III solo se ha realizado a 28 días por falta de material reciclado. Y en la generación III no se realizó para los tipos de hormigón 6-6-RAC-0 y 6-6-RAC-6.

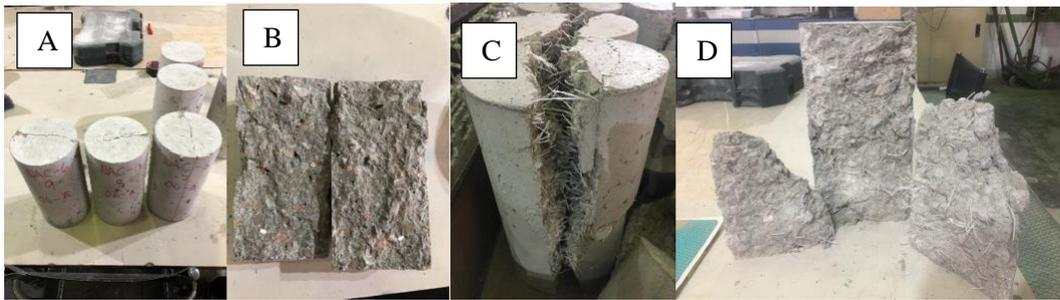


Figura 33: Aspecto post ensayo de tracción indirecta. (A) probetas post ensayo. (B) probetas del hormigón sin fibras. (C) probetas de hormigón con fibras abiertas. (D) probetas de hormigón con fibras partidas por la mitad.

#### Módulo de elasticidad:

El ensayo de módulo de elasticidad se realiza de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-13:2014. El ensayo consiste en someter la probeta a varios de ciclos de carga de compresión y obtener la deformación que se produce.



Figura 34: Realización del ensayo del módulo de elasticidad en probeta de  $\varnothing 150/300\text{mm}$

El ensayo se realizó con una carga máxima de 1/3 carga de rotura, dado que esa carga se encuentra en la zona elástica y por lo tanto no habría deformaciones plásticas. El ensayo se realizó tanto para las probetas con edades de curación de 7 días como a 28 días, y en todas las generaciones.

### Ensayo Barcelona o Resistencia residual:

El objetivo de este ensayo es calcular la resistencia residual del hormigón. La resistencia residual es la resistencia proporcionada por las fibras y que ofrece el hormigón después de rotura.

El ensayo se ha realizado de acuerdo con la norma UNE 83515:2010 y mediante el ensayo de Barcelona.

El ensayo consiste en poner a una probeta cilíndrica de hormigón de 150 milímetros de altura de manera vertical entre las placas de carga a compresión, utilizando dos punzones circulares de acero dispuestos concéntricamente encima y debajo de la muestra a ensayar.

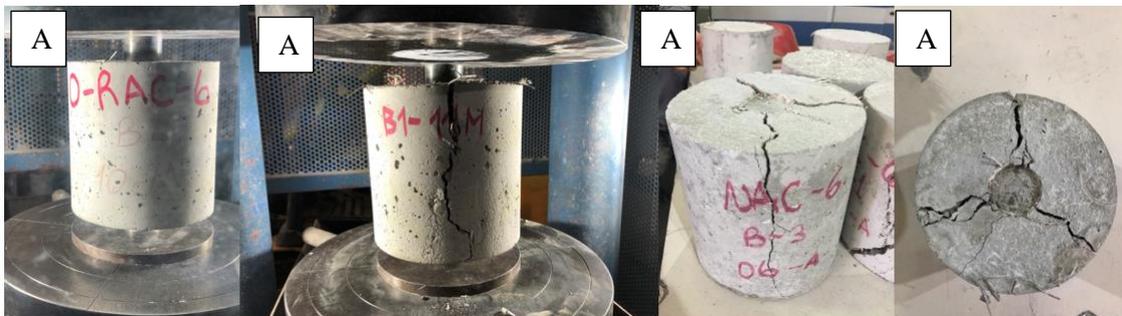


Figura 35: Realización del ensayo Barcelona. (A) colocación de probetas para el doble punzonamiento. (B) probeta post rotura. (C) aspecto de probeta post ensayo. (D) partición de probeta en 3 partes. 3 fisuras.

## Capítulo 4

### 4. Resultados obtenidos

En el apartado anterior se han expuesto los diferentes métodos que se emplearon tanto para la caracterización de los áridos como la caracterización del hormigón. Al ejecutar todos estos ensayos se han obtenido resultados que deben ser analizados y consecuentemente se deben sacar las conclusiones.

El objetivo de este capítulo es presentar y analizar los datos obtenidos mediante diferentes ensayos. Hacer las comparaciones de diferentes propiedades entre las diferentes generaciones de hormigones y áridos, y sacar conclusiones.

Respecto los áridos, se han estudiado las propiedades; granulométricas según la norma UNE-EN 933-1:2012 y UNE-EN 933-2/1M:1999, y de densidad y absorción de acuerdo con las normas UNE-EN 1097-6:2014.

La caracterización del hormigón se ha hecho tanto en estado fresco como endurecido. En estado fresco se ha hecho comprobaciones respecto a la consistencia del hormigón, con el método cono de Abraham y según la norma UNE-EN 12350-2:2020.

Por otro lado, en estado endurecido, se han estudiado las propiedades mecánicas, cuando ha sido posible, tanto a 7 días del curado como a 28 días. Las propiedades estudiadas son resistencia a compresión mediante ensayo de compresión y de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-3:2020, resistencia a tracción con el ensayo de tracción indirecta o brasileño según la norma UNE-EN 12390-6:2010, el módulo de elasticidad con la normativa UNE-EN 12390-13:2014 y la resistencia residual mediante el ensayo Barcelona y de acuerdo con la norma UNE 83515:2010.

## 4.1 Caracterización de los áridos

### 4.1.1 Obtención de áridos

Como se ha comentado anteriormente, el árido reciclado se obtiene a partir del reciclaje de las probetas fabricadas y ensayadas en la generación anterior. Dado que algunas de las probetas eran ensayadas a los 7 días de curación y otras a 28 días, se decidió hacer la trituration de las probetas a los 28 días, para ser más eficientes y ocupar lo menos posible el laboratorio.

Hay que tener en cuenta que la trituration de las probetas con fibras se tardaba casi el doble que las probetas sin fibras. Tiempo de trituration para probetas con fibras era de unos 35 -40 s aproximadamente. Mientras que las sin fibras tardaban unos 18 – 20s.

Los resultados obtenidos mediante la trituration de las probetas se indican en la tabla 10 y se visualizan en los gráficos 2.

Pre-trituración (kg)		Post trituration (kg)				% pérdidas	% no reciclado	% reciclado
procedencia	peso probetas	reciclado		no reciclado				
		4/12 mm	12/20 mm	0/4 mm	20+ mm			
<b>0 - NAC</b>	260,9	113,46	79,42	60,6		-3%	23%	<b>74%</b>
<b>6 - NAC</b>	259,32	102,98	53,63	84,63		-7%	33%	<b>60%</b>
<b>0 - 0 RAC</b>	165,62	64,11	46,84	40,91	1,17	-8%	25%	<b>67%</b>
<b>0 - 6 RAC</b>	167,45	60,36	33,77	44,60	3,35	-15%	29%	<b>56%</b>
<b>6 - 0 RAC</b>	102,29	36,89	24,86	29,56	1,40	-9%	30%	<b>60%</b>
<b>6 - 6 RAC</b>	98,45	33,93	17,19	30,49	2,63	-14%	34%	<b>52%</b>

Tabla 10: la cantidad de árido perdido, no reciclado y reciclado una vez trituradas las probetas.

Se puede observar en la tabla 10 y en los gráficos 2 que, a medida que aumenta los ciclos reciclajes disminuyen los porcentajes del material reciclado.

Haciendo una comparación por tipos de hormigón, se puede observar que, los hormigones que no llevan fibras en ninguna de las generaciones, el porcentaje de los áridos reciclados se baja del 74% (NAC – 0) al 67% (0 – 0 RAC). Comprando estos resultados con los hormigones que no llevan fibras en la última generación, se puede observar que el porcentaje del árido reciclado baja hasta el 60% (6-0 RAC).

Se puede observar que en los hormigones con fibras el porcentaje del material reciclado, en la mayoría, se sitúa por encima del 30% e incluso llegando hasta el 34%.

Mientras que, en los hormigones sin fibras, la tasa varía entre 23% -25%.

Se puede observar que en los hormigones con fibras el porcentaje de pérdida es mayor. Esto se debe a la partición de las probetas en 2 trozos para luego poder hacer la trituration. Dicha partición se hacía mediante maceta y clavo, y al ser un hormigón con fibras era más complicado romper las probetas.

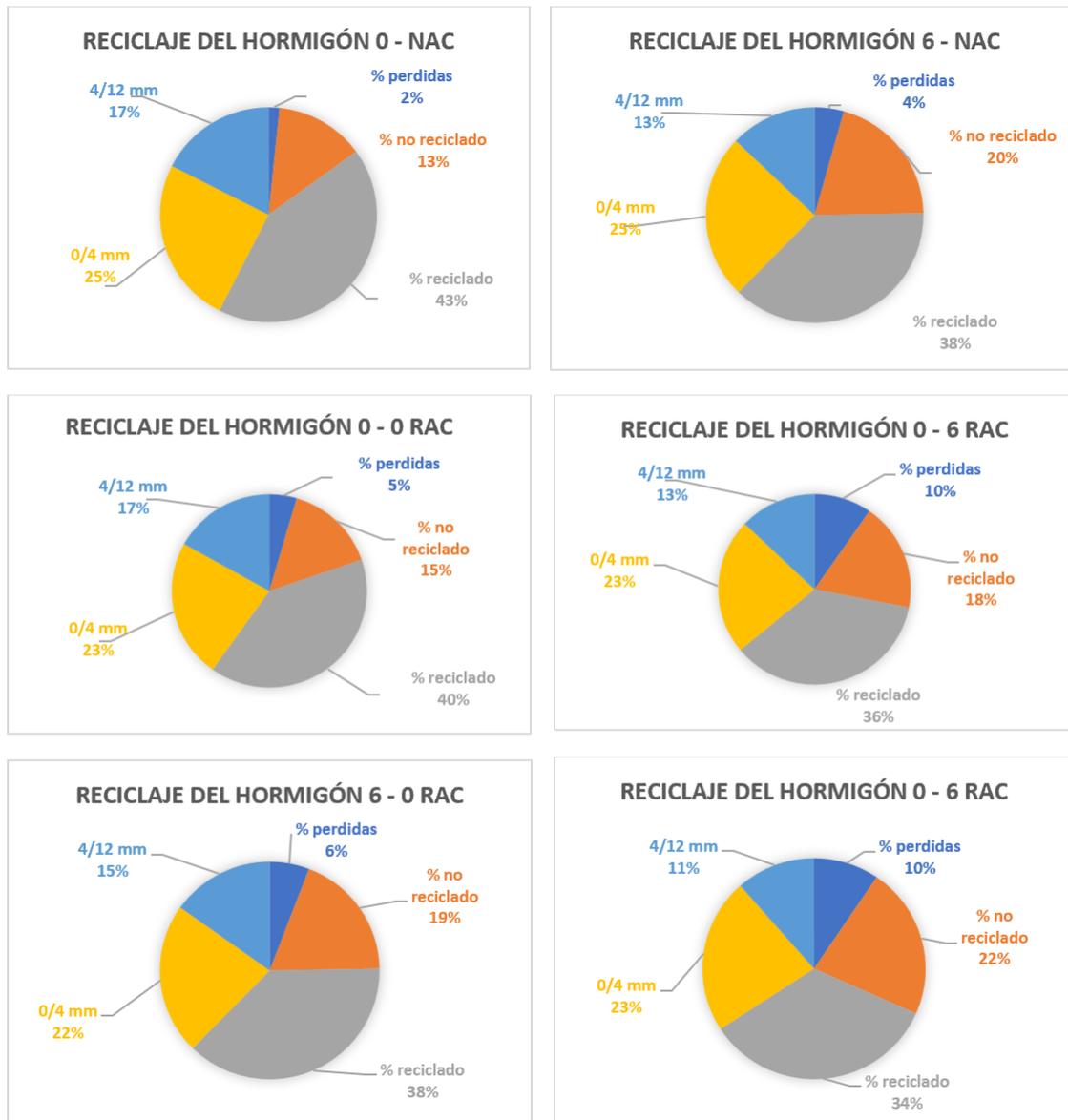


Gráfico 2: gráficos del reciclaje de diferentes hormigones. (A) Reciclaje de áridos procedentes hormigones 0-NAC (B) Reciclaje de áridos procedentes hormigones 6-NAC (c) Reciclaje de áridos procedentes hormigones 0-0 RAC (D) Reciclaje de áridos procedentes hormigones 0-6 RAC (E) Reciclaje de áridos procedentes hormigones 6-0 RAC (F) Reciclaje de áridos procedentes hormigones 6-6 RAC.

#### 4.1.2 Contenido de fibras

Una vez triturado se procede a cuantificar el contenido de fibras presente en el material triturado. La cuantificación de fibras se clasifica de 2 maneras; fibras sueltas y fibras adheridas al árido.

##### Fibras sueltas

La cuantificación de fibras sueltas se ha hecho mediante el método de flotación y separación manual. Los métodos se han explicado anteriormente. La técnica de flotación se ha hecho para todos los hormigones sin fibras, mientras que la técnica de separación manual se ha realizado en los áridos procedentes de la generación II. La técnica de separación manual fue introducida después de la realización de la generación I, es por eso por lo que no se dispone de datos relativos a la generación I para la técnica de separación manual.

Fibras sueltas					
	Técnica de flotación		Técnica de separación manual		
	kg/kg	Tasa	4/12	12/20	Tasa
			Kg/kg	Kg/kg	
<b>6 - RCA</b>	0,0011	44%	-	-	-
<b>0-6 RCA</b>	0,0016	64%	0,001	0,0002	48%

Tabla 11: Resultados obtenidos de fibras sueltas en el árido.

Como podemos observar en la tabla 11, los datos varían bastante según la técnica utilizada.

Se puede observar que la cuantía de recuperación de fibras es del 44% para el árido 6-RCA, lo que supone que el resto de las fibras, o han sido perdidas con la separación y eliminación de los áridos 0/4 mm y 20+mm, o están incrustadas en los áridos.

Podemos observar también la diferencia entre los 2 métodos, para el árido 0-6 RCA, la diferencia es del 12%. Esta diferencias pueden ser debidas a las cuantías de las muestras ensayadas. En el método de flotación la cantidad ensayada fue de 5kg mientras que en la de separación manual era 1 kg.

Se puede observar claramente que el contenido de fibras sueltas es mayor en los áridos 4/12mm comparado con los áridos 12/20mm.

### Fibras adheridas al árido

La cuantificación de fibras adheridas al árido se hace por el método de quema de fibras y la técnica de Canteo manual. Igual que en las fibras sueltas, uno de los métodos fue introducidos después de la generación I, por eso no se dispone de resultados para dicha generación.

fibras adheridas al árido						
	Técnica de Canteo manual			Técnica de Quema/Incineración		
	4/12	12/20	Tasa	4/12	12/20	Tasa
	Kg/kg	Kg/kg		Kg/kg	Kg/kg	
<b>6 - RCA</b>	-	-	-	0,0046	0,0026	288%
<b>0-6 RCA</b>	0,0002	0,0005	28%	0,006	0,0031	364%
<b>6-0 RCA</b>	0,0006	0,0006	48%	0,0053	0,0038	364%
<b>6-6 RCA</b>	0,0004	0,001	56%	0,0062	0,003	368%

Tabla 12: Resultados obtenido de fibras adheridas al árido.

Si miramos los resultados de la tabla 12, podemos observar que los resultados obtenidos por el método o técnica de incineración no son representativos, dado que las tasas de recuperación son por encima de las fibras adicionadas, por lo que no tiene ningún sentido. Esto puede ser debido a, aunque las fibras se descompusieran, los restos se enganchaban en los áridos, por lo que el resultado no sería representativo. por lo tanto, se puede decir que, o que la técnica no fue empleada de manera correcta o la técnica en si no era la adecuada.

Por otro lado, si miramos los resultados del canteo manual, tiene más sentido. Podemos observar que los áridos 0-6 RCA, en contenido de fibras adheridas al árido ha sido del 28%. En los áridos 6-0 RCA ha sido del 48%, y en los áridos 6-6 RCA ha sido del 56%. El 6-6 RCA representa el dato más alto, eso puede ser debido que las árido es procedentes de 2 generaciones anteriores con contenido de fibras adicionadas en cada una de ellas.

Se puede observar claramente que el contenido de fibras adheridas al árido es menor en los áridos 4/12mm comparado con los áridos 12/20mm. Esto puede ser debido a la adherencia del

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

mortero al árido. Al haber más mortero adherido las fibras se quedan fácilmente incrustadas en los áridos 12/20mm respecto los áridos 4/12mm.

### 4.1.3 Contenido de finos

El contenido de finos es uno de los factores a tener en cuenta a la hora de caracterizar el hormigón, dado que puede afectar el contenido de agua y el fraguado del hormigón y, por lo tanto, la resistencia del hormigón.

El método para caracterizar esta propiedad del árido se ha descrito anteriormente en metodologías empleadas para la caracterización de los áridos.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 13 para la gravilla (árido 4/12 mm) y en la tabla 14 para la grava (árido 12/20 mm).

Procedencia	Tipo de árido			
	4/12			
	Peso muestra (g)	Peso lavado y seco (g)	Finos muestra (g)	Finos muestra (%)
NA	1167,5	1161,2	6,3	0,5%
0 - RCA	1855,1	1754,1	101	5,4%
6 - RCA	1499,7	1427,3	72,4	4,8%
0 - 0 RCA	1150,4	1072,0	78,4	6,8%
0 - 6 RCA	1174,9	1087,8	87,1	7,4%
6 - 0 RCA	1230,2	1146,2	84	6,8%
6 - 6 RCA	1126,2	1126,2	79,4	6,6%

Tabla 13: Contenido de finos del árido 4/12 mm (Gravilla)

Procedencia	Tipo de árido			
	12/20			
	Peso muestra (g)	Peso lavado y seco (g)	Finos muestra (g)	Finos muestra (%)
NA	1390,2	1356,9	33,3	2,4%
0 - RCA	1413,3	1350,4	62,9	4,5%
6 - RCA	1566,4	1505,7	60,7	3,9%
0 - 0 RCA	1154,6	1080,7	73,9	6,4%
0 - 6 RCA	1153,4	1071,8	81,6	7,1%
6 - 0 RCA	1167,1	1088,4	78,7	6,7%
6 - 6 RCA	1067,8	1067,8	71,5	6,3%

Tabla 14: Contenido de finos del árido 12/20 mm (Grava)

cómo podemos observar en las tablas 13 y 14 Y en el grafico 3 el contenido de finos aumenta a la medida que se aumentan los ciclos de reciclaje.

Se puede observar una diferencia importante (0,5% del 4/12mm respecto 2,4% en 12/20mm) en el contenido de finos. Pero a medida que aumentan los ciclos de reciclaje esa diferencia es casi nula.

Se puede observar también que el contenido de finos es menor en el árido 12/20 mm ( 0,5% al 1%), que en los áridos naturales se situaba un 2% por encima.

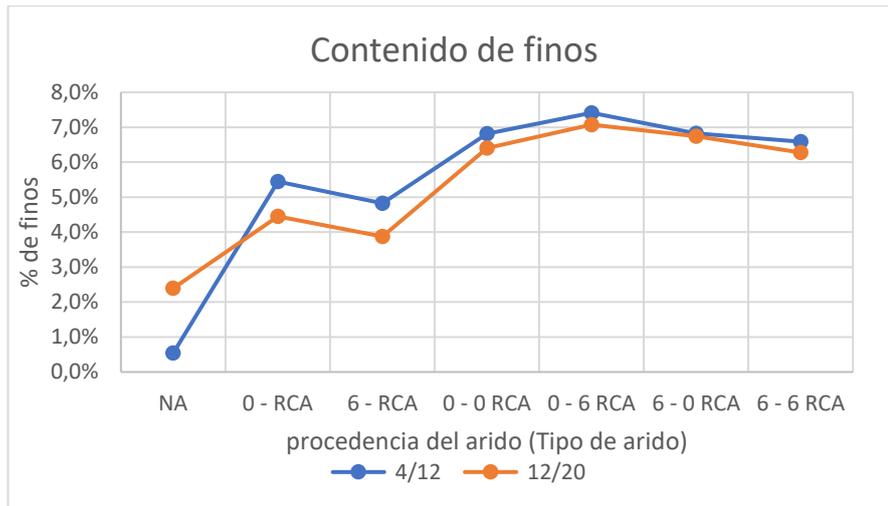


Gráfico 3: Contenido de finos; comparación de áridos 4/12mm (gravilla) y 12/20mm (grava)

#### 4.1.4 Absorción y densidad

La absorción y la densidad de los áridos son factores importantes para la dosificación del hormigón. Los ensayos se han llevado a cabo como se ha explicado en el apartado métodos empleados y de acuerdo con la norma UNE-EN 1097-6:2014. A continuación, en las tablas 15 y 16 se muestran los datos obtenidos y analizado a partir de los ensayos realizados.

En los resultados se pueden observar que la absorción tanto en los áridos 4/12 mm como en los 12/20 mm es muy parecida. La absorción en los áridos 4/12 mm es ligeramente mayor que en los 12/20mm. Se puede observar que en la medida que aumentan los ciclos de reciclajes, aumenta la absorción.

En los áridos 4/12 mm, después del reciclaje de la primera generación de hormigones, la absorción aumenta del 0,94 al 6% en caso de los hormigones sin fibras, hasta un casi 5,5% en los áridos precedentes de generación I con fibras.

Se puede observar que los áridos procedentes de hormigón sin fibras, la absorción aumenta del 6% al 9,52% en caso de hormigón sin fibras y hasta 9,45% en caso de hormigón con fibras.

Por lado, se puede observar que la absorción en los áridos procedentes de hormigones con fibras, es ligeramente menor que en los áridos sin fibras.

En los áridos 12/20 mm, pasa algo muy similar que los áridos 4/12mm.

Se puede observar que el aumento de la absorción es ligeramente menor, pero siguen la misma secuencia. El aumento en los hormigones con fibras es ligeramente menor que los que no llevan fibras.

Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Procedencia del árido	Peso saturado superficialmente seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso seco (g)	Densidad (seca) (gr/ml)	Absorción %
NA	1109,5	694,7	1099,2	2,65	0,94%
0 - RCA	1813,7	1073,0	1711	2,31	6,00%
6 - RCA	1426,3	846,5	1352,3	2,33	5,47%
0 - 0 - RCA	1283,6	734,0	1172,0	2,13	9,52%
0 - 6 - RCA	1157,3	659,3	1057,4	2,12	9,45%
6 - 0 - RCA	1129,2	639,7	1040,7	2,13	8,50%
6 - 6 - RCA	1133,3	644,6	1045,0	2,14	8,45%

Tabla 15: Resultados obtenidos de la Densidad y Absorción a 24h. (Árido 4/12 mm)

Procedencia del árido	Peso saturado superficialmente seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso seco (g)	Densidad (seca) (gr/ml)	Absorción %
NA	1619,3	1009,2	1605,8	2,63	0,84%
0 - RCA	1374,0	814,6	1302,5	2,33	5,49%
6 - RCA	1512,0	900,4	1444,3	2,36	4,69%
0 - 0 - RCA	1222,5	698,9	1121,4	2,14	9,02%
0 - 6 - RCA	1137,1	645,6	1042,9	2,12	9,03%
6 - 0 - RCA	1199,3	701,6	1108,1	2,23	8,23%
6 - 6 - RCA	1126,5	641,2	1042,9	2,15	8,02%

Tabla 16: Resultados obtenidos de la Densidad y Absorción a 24h. (Árido 12/20 mm)

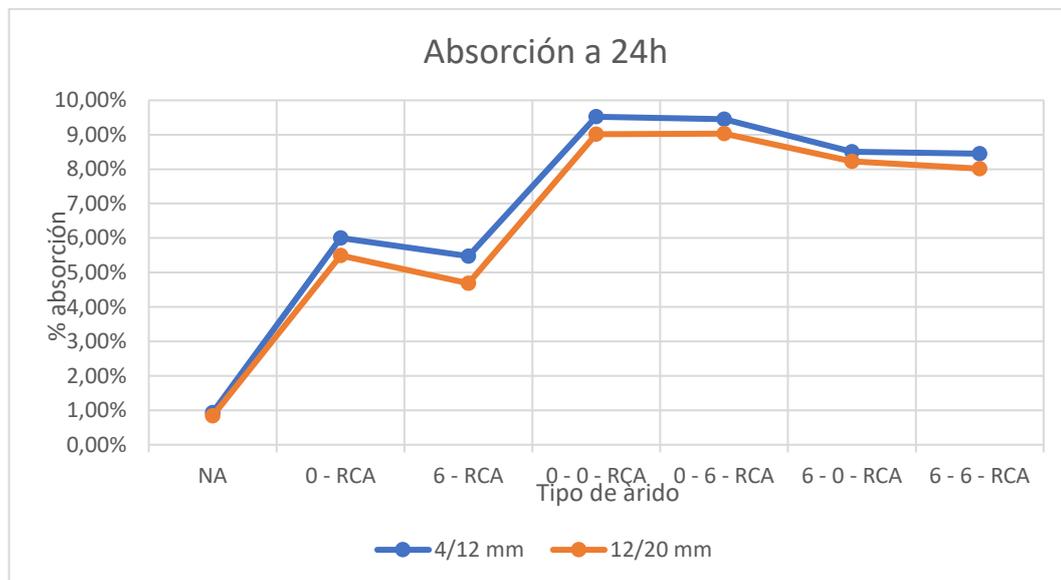


Gráfico 4: Comparación entre áridos del 4/12mm y 12/20mm. Resultados obtenidos para la absorción a 24h.

Respecto a la densidad, a la medida que aumentan los ciclos de reciclajes disminuyen los valores de la densidad real.

Tanto en los áridos 4/12mm como en los 12/20mm los valores son muy similares. Varían entre 0,00 – 0,02 gr/ml. Se puede observar también que uno de los valores de la densidad (12/20 mm y áridos del 6-0 RCA) varía mucho respecto a los demás. Se podría considerar como un error en el ensayo, ya que esa variación no se observa en la absorción ni en otros casos de la densidad.

Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Se puede observar que, a diferencia de la absorción, no se observa la influencia de las fibras en los valores de la densidad.

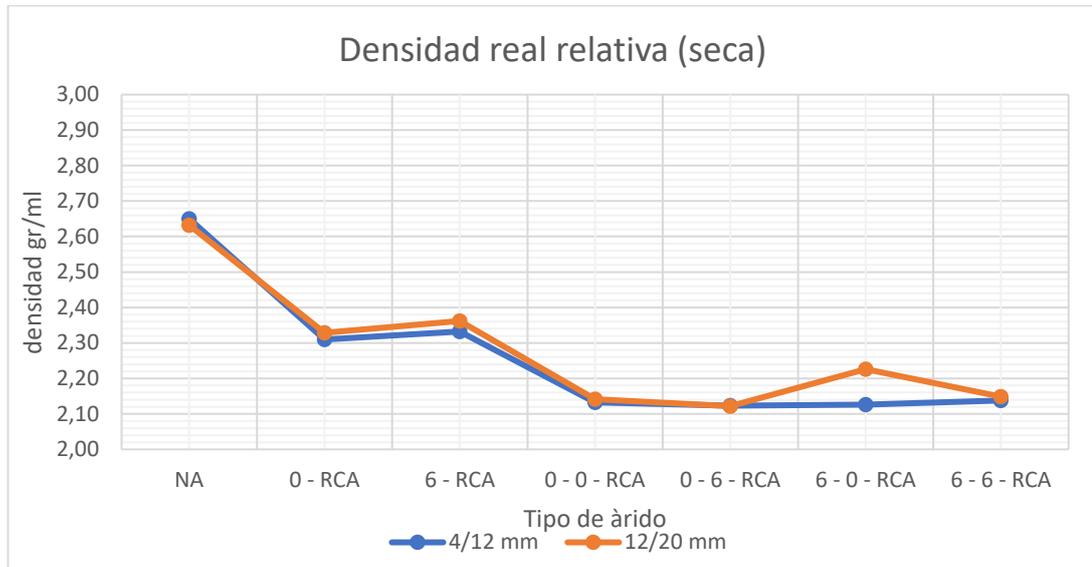


Gráfico 5: Comparación entre áridos del 4/12mm y 12/20mm. Resultados obtenidos para la densidad.

En la absorción a 1h, se pueden observar varias anomalías.

Se han obtenido valores de absorción a 1h mayores que los valores a 24h. esto podría haber sido debido a un error humano, (perdida del material durante el ensayo) o a la hora de medición (anotación de datos) o a un error de la báscula.

Dado que los ensayos realizados y la notación de los resultados eran revisado varias veces, el error puede ser debido a la báscula. Como se puede observar, los datos no son coherentes en la generación II y los que se realizaron el mismo día.

Procedencia del árido	4/12 mm			12/20 mm		
	Peso saturado superficialmente seco (g)	Peso seco (g)	Absorción (%)	Peso saturado superficialmente seco (g)	Peso seco (g)	Absorción (%)
NA	-	-	-	-	-	-
0 - RCA	1435,3	1353,9	6,01%	1937,2	1836	5,51%
6 - RCA	1370,4	1299,4	5,46%	1316,5	1260,4	4,45%
0 - 0 - RCA	1253,9	1145,8	9,43%	1120,1	1025,9	9,18%
0 - 6 - RCA	1094,3	1000,4	9,39%	1137,5	1040,5	9,32%
6 - 0 - RCA	1252,3	1155,3	8,40%	1221,6	1128,3	8,27%
6 - 6 - RCA	1252,3	1157,1	8,23%	1246,2	1156,2	7,78%

Tabla 17: Resultados obtenidos para la Absorción a 1 h. (Áridos 4/12 y 12/20mm.)

Tanto en la gráfica de absorción a 24h (grafico 4) como en la absorción a 1h (grafico 6), ambas siguen el mismo patrón. Tal como ocurre en la absorción a 24h, los áridos procedentes de hormigones sin fibras presenten un aumento ligero de absorción respecto a los procedentes de hormigones con fibras.

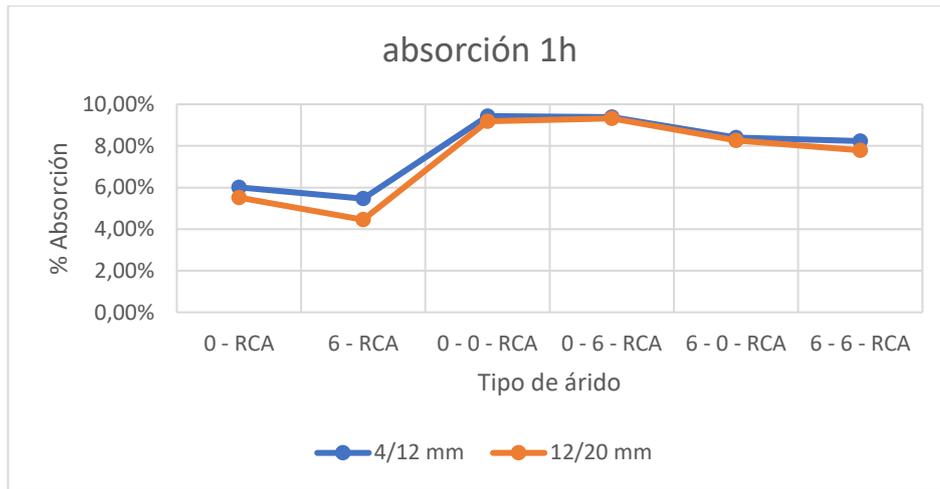


Gráfico 6: Resultados obtenidos para la absorción 1h. comparación entre áridos 4/12 y 12/20mm.

#### 4.1.5 Granulometría

Otro de los ensayos realizados para la caracterización del árido ha sido el ensayo granulométrico. El ensayo se realizó en los áridos gruesos y de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1:2012 y UNE-EN 933-2/1M:1999.



Figura 36: Realización del ensayo granulométrico en los áridos reciclados.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo se muestran a continuación, en los gráficos 7 y 8. Se puede observar que las curvas granulométricas obtenidas en los áridos reciclados son muy similares a las de los áridos naturales (NA), y por lo tanto no existe grandes diferencias.

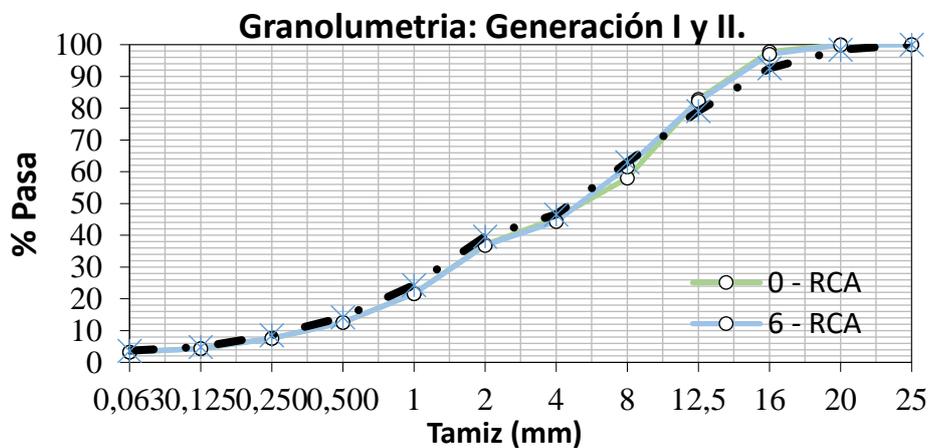


Gráfico 7: Comparación curvas granulométrica generación I (NA) y generación II.

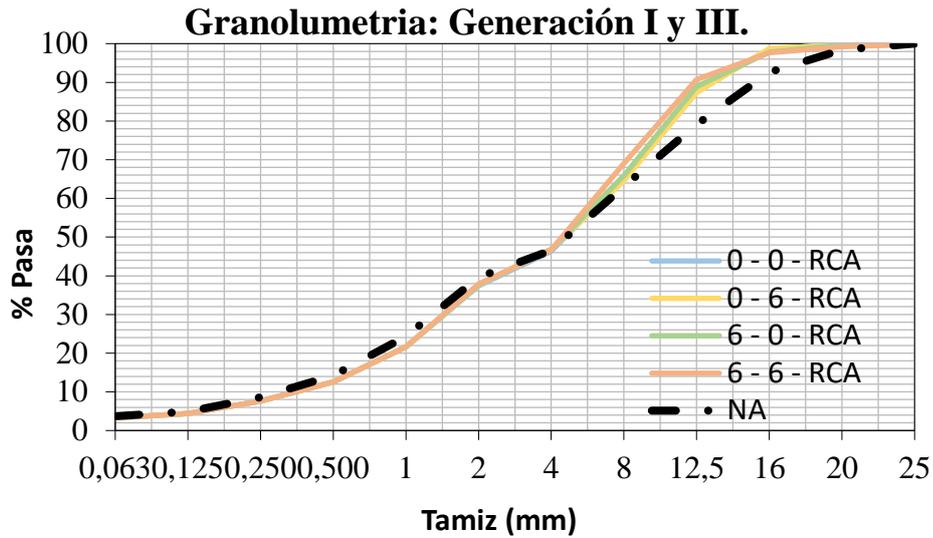


Gráfico 8: Comparación curvas granulométrica generación I (NA) y generación III.

## 4.2 Caracterización del hormigón

La caracterización del hormigón se ha hecho tanto en estado fresco como en estado endurecido.

### Estado fresco

#### 4.2.1 Consistencia

La consistencia del hormigón se ha calculado mediante el ensayo de cono de Abraham. Dado que el objetivo era conseguir una consistencia de entre 100 – 150 mm, si al realizar el ensayo, la consistencia no se encontraba dentro del objetivo, se procedía a hacer el uso del superplastificante.



Figura 37: realización del ensayo de cono de Abraham en hormigón con fibras.

El ensayo se realizó en todas las amasadas fabricadas. A continuación, en la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos.

A la hora de fabricar hormigones y realizar ensayos se han hecho las siguientes observaciones:

La consistencia de los hormigones sin fibras estaba dentro del límite establecido sin añadir aditivos.

Los hormigones con fibras, incluso añadiendo la máxima cantidad de aditivos (1%), en algunas de la amasadas la consistencia medida mediante el cono de Abraham no quedaba dentro del límite establecido. Esto se debe al efecto de coser de las fibras. (observar figura 37) Al compactar el material, este se quedaba cosido y nos indicaba una consistencia más dura de lo que era. Al observar el material, se podía ver que las amasada estaban bastante liquidas y no cuadraba con la consistencia que nos indicaba el cono de Abraham. Un claro ejemplo sería el hormigón 6-6-6 RAC, donde se obtuvo un cono de Abraham de 10mm, pero el material era mucho más liquido de lo indicado. (observar tabla 18)

Tipo de hormigón	Asiento Cono (mm)					Asiento Promedio (mm)
	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	Volumen (L)	
0 - NAC	150	130	100	110	4x30	123
6 - NAC	100	130	110	120	4x30	115
0 - 0 RAC	210	190	220	-	3x27	207
0 - 6 RAC	185	180	180	-	3x27	182
6 - 0 RAC	150	155	-	-	2x24	153
6 - 6 RAC	90	70	-	-	2x24	80
0 - 0 - 0 RAC	220	-	-	-	1x33	220
0 - 0 - 6 RAC	190	-	-	-	1x33	190
0 - 6 - 0 RAC	200	-	-	-	1x33	200
0 - 6 - 6 RAC	100	-	-	-	1x33	100
6 - 0 - 0 RAC	155	-	-	-	1x25	155
6 - 0 - 6 RAC	120	-	-	-	1x25	120
6 - 6 - 0 RAC	130	-	-	-	1x21	130
6 - 6 - 6 RAC	10	-	-	-	1x21	10

Tabla 18: Resultados de consistencia obtenidos mediante ensayo cono de Abraham.

### Estado endurecido:

#### 4.2.2 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se ha calculado de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-3:2020 y mediante el ensayo de compresión. La carga de aplicación va incrementando a velocidad constante, e igual a 0,5 MPa/s, hasta llegar a la rotura. Este ensayo se ha realizado en probetas, o a los 7 días del curado o a los 28 días.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 20 y 21. Y también se muestran gráficamente en la gráfica 9.

Como se puede observar en las tablas 20 y 21, el ensayo se realizó o en probetas de Ø100/200 o Ø150/300, dependiendo del material disponible. Incluso en la generación III en algunos tipos de hormigones no se realizaron los ensayos a los 7 días.

Para comparar los resultados, dado que hay 2 tipos de probetas, se ha hecho un cálculo mediante un factor de corrección para normalizar los cálculos. El factor de corrección F4 establecido por Pérez Sánchez, Mariano (1997), se muestra en la tabla 14.

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

Tabla 19: factor de corrección establecido por Pérez Sánchez, Mariano (1997)

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

En nuestro caso, hemos optado por un factor de corrección de 0,9. Por lo que, nos queda la siguiente formulación.

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

Resistencia a compresión a 7 días										
	probetas	Tipo de hormigón	Peso promedio. (g)	H promedio (mm)	F <sub>ult</sub> (kN)	f <sub>cm</sub> (Ø=100) (MPa)	f <sub>cm</sub> (Ø=150) (MPa)	f <sub>cm</sub> (Ø <sub>eq</sub> =150) (MPa)	CoV (%)	
<b>Generación I</b>	(Ø = 150)	0 - NAC	12389,3	296,8	593,3	-	33,6	<b>33,6</b>	5,8%	
		6 - NAC	12254,2	295,5	603,3	-	34,1	<b>34,1</b>	1,5%	
<b>Generación II</b>	(Ø = 100)	0 - 0 RAC	11770,3	296,1	475,9	-	26,9	<b>26,9</b>	4,5%	
		0 - 6 RAC	11691,5	295,9	419,0	-	23,7	<b>23,7</b>	4,1%	
		0 - 0 RAC	3424,2	195,2	181,3	23,1	-	<b>25,6</b>	4,6%	
		0 - 6 RAC	3390,8	194,6	171,3	21,8	-	<b>24,2</b>	1,9%	
		6 - 0 RAC	3436,2	194,5	186,8	23,8	-	<b>26,4</b>	12,0%	
		6 - 6 RAC	3429,7	194,4	188,3	24,0	-	<b>26,6</b>	1,6%	
<b>Generación III</b>	(Ø = 100)	0 - 0 - 0 RAC	3314,2	194,5	139,0	17,7	-	<b>19,7</b>	5,6%	
		0 - 0 - 6 RAC	3268,8	194,6	128,5	16,4	-	<b>18,2</b>	1,6%	
		0 - 6 - 0 RAC	3295,2	194,4	121,3	15,4	-	<b>17,2</b>	18,3%	
		0 - 6 - 6 RAC	3266,3	195,0	132,5	16,9	-	<b>18,8</b>	3,5%	
		6 - 0 - 0 RAC	-	-	-	-	-	-	-	-
		6 - 0 - 6 RAC	-	-	-	-	-	-	-	-
		6 - 6 - 0 RAC	-	-	-	-	-	-	-	-
		6 - 6 - 6 RAC	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 20: Resultados obtenidos de para la resistencia a compresión a los 7 días del curado.

Resistencia a compresión a 28 días									
	probetas	tipo de hormigón	Peso promedio. (g)	H promedio (mm)	F <sub>ult</sub> (kN)	f <sub>cm</sub> (Ø = 100) (MPa)	f <sub>cm</sub> (Ø=150) (MPa)	f <sub>cm</sub> (Ø <sub>eq</sub> =150) (MPa)	CoV (%)
<b>Generación I</b>	(Ø = 150)	0 - NAC	12364,2	297,0	710,3	-	40,2	<b>40,2</b>	1,3%
		6 - NAC	12397,0	300,0	707,7	-	40,0	<b>40,0</b>	5,8%
<b>Generación II</b>	(Ø = 100)	0 - 0 RAC	11776,2	295,1	557,9	-	31,6	<b>31,6</b>	5,1%
		0 - 6 RAC	11702,8	295,5	522,5	-	29,6	<b>29,6</b>	2,9%
		0 - 0 RAC	3426,3	194,8	203,8	25,9	-	<b>28,8</b>	9,0%
		0 - 6 RAC	3414,7	194,9	204,2	26,0	-	<b>28,9</b>	4,0%
		6 - 0 RAC	3457,0	194,9	196,2	25,0	-	<b>27,8</b>	10,1%
		6 - 6 RAC	3452,5	195,6	193,2	24,6	-	<b>27,3</b>	3,0%
<b>Generación III</b>	(Ø = 100)	0 - 0 - 0 RAC	3324,3	195,4	175,2	22,3	-	<b>24,8</b>	1,7%
		0 - 0 - 6 RAC	3289,2	195,4	157,2	20,0	-	<b>22,2</b>	6,5%
		0 - 6 - 0 RAC	3302,0	195,3	161,2	20,5	-	<b>22,8</b>	5,8%
		0 - 6 - 6 RAC	3248,7	195,4	154,8	19,7	-	<b>21,9</b>	3,7%
		6 - 0 - 0 RAC	3312,8	195,3	182,0	23,2	-	<b>25,7</b>	1,0%
		6 - 0 - 6 RAC	3328,3	195,3	183,9	23,4	-	<b>26,0</b>	1,7%
		6 - 6 - 0 RAC	3340,7	195,3	193,1	24,6	-	<b>27,3</b>	0,8%
		6 - 6 - 6 RAC	3343,2	195,4	179,3	22,8	-	<b>25,4</b>	6,6%

Tabla 21: Resultados obtenidos de para la resistencia a compresión a los 28 días del curado.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Tanto en el gráfico 9 como en las tablas 20 y 21 de resultados se puede observar la caída de la resistencia a compresión en los hormigones con áridos reciclados (generaciones II y III) respecto a los hormigones con áridos naturales (Generación I).

La resistencia media a compresión (a 28 días) de la generación I es del 40,1 MPa, mientras que la de la generación II es de 29MPa. Esto supone una bajada de resistencia a compresión del 27,68% de la generación II respecto a la generación I.

Ahora si comparamos las generaciones I y III, podemos observar que las resistencias medias a compresión (a los 28 días) son del 40,1 MPa y 24,5 MPa respectivamente. Esto supone una bajada de resistencia a compresión del 38,71% de la generación III respecto a la generación I.

Si observamos los valores obtenidos a los 7 días, la generación I presenta una resistencia media a compresión del 33,85MPa, mientras que la generación II presenta una resistencia media del 25,56MPa.

La bajada de la resistencia a compresión de la generación II respecto la generación I, es del 24,47%. Mientras, si comparamos las generaciones I y III, la resistencia a compresión media baja un 45,42%. Las resistencias medias a compresión son del 18,47MPa de la generación III respecto al 33,85MPa de la generación I.

Dado que la resistencia baja a medida que aumentan los ciclos de reciclaje, y al no observar no ningún tipo de relación entre el contenido de fibras y la resistencia, podemos decir y como era de esperar, la resistencia a compresión no se ve afectada por el contenido de fibras. Si se ve afectada por el contenido de agua (absorción de los áridos), a medida que aumentan los ciclos de reciclajes, aumenta la absorción de los áridos y por lo tanto baja la resistencia también.

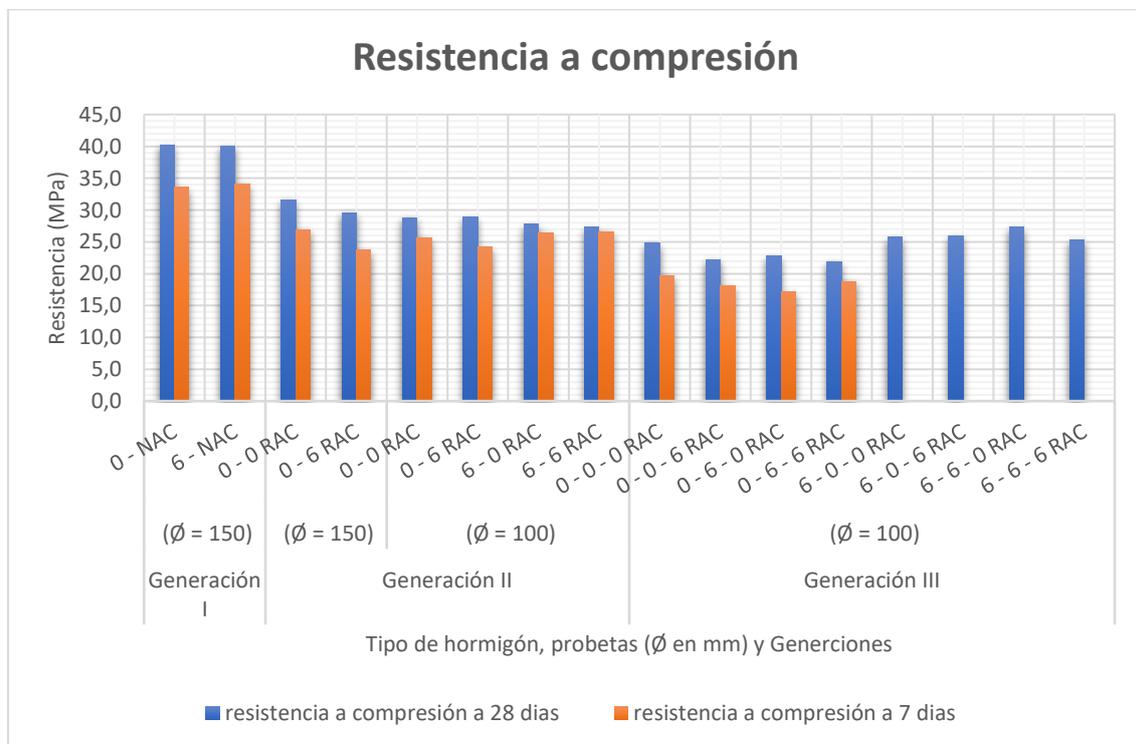


Gráfico 9: Representación gráfica de los resultados obtenidos de la resistencia a compresión.

### 4.2.3 Resistencia a tracción

Como se ha explicado en metodología, la resistencia a tracción se ha obtenido mediante el ensayo brasileño. También hay que señalar que, por falta de material, algunas de las probetas de la generación II y las probetas de generación III, primero fueron ensayadas a módulo de elasticidad y luego fueron sometidas a tracción indirecta. Los ensayos fueron realizado a 28 días, menos en la generación I donde se hicieron tanto a 7 días como a 28 días.

También señalar, y como se puede ver en la tabla 23, en los hormigones 6 6-0 RAC y 6-6-6 RAC, por falta de material no fue posible realizar los ensayos.

El cálculo de la resistencia a tracción se ha hecho según la Instrucción Española y mediante la expresión que se muestra a continuación.

$$f_{ct} = 0,9 * f_{cti}$$

$$f_{cti} = \frac{2 * P}{\pi * D * L}$$

Donde,

- $f_{cti}$ , resistencia a tracción (N/mm<sup>2</sup>)
- P, carga de compresión de rotura (N)
- D, diámetro de la probeta (mm)
- L, longitud de la probeta (mm)

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 22 y 23. Y se representan en la gráfica 10.

Resistencia a tracción a 7 días									
	probetas	Tipo de hormigón	Peso promedio. (g)	H promedio (mm)	F <sub>ult</sub> (kN)	f <sub>ctm</sub> (Ø=100) (MPa)	f <sub>ctm</sub> (Ø=150) (MPa)	Desv. Estand.	CoV (%)
Generación I	(Ø = 150)	0 - NAC	12403,0	296,9	191,0	2,73	0,23	8,5%	2,35
		6 - NAC	12268,0	295,7	167,6	2,41	0,08	3,2%	2,28

Tabla 22: Resultados de resistencia a tracción a los 7 días.

Resistencia a tracción a 28 días									
	probetas	Tipo de hormigón	Peso promedio. (g)	H promedio (mm)	F <sub>ult</sub> (kN)	f <sub>ctm</sub> (Ø=100) (MPa)	f <sub>ctm</sub> (Ø=150) (MPa)	Desv. Estand.	CoV (%)
Generación I	(Ø = 150)	0 - NAC	12391,3	300,2	207,6	-	2,9	0,11	3,8%
		6 - NAC	12379,2	297,4	231,0	-	3,3	0,13	3,9%
Generación II	(Ø = 150)	0 - 0 RAC	11809,5	295,7	199,5	-	2,9	0,33	11,4%
		0 - 6 RAC	11685,5	296,3	176,3	-	2,5	0,60	23,7%
		6 - 0 RAC	11825,8	296,5	187,5	-	2,7	0,29	10,7%
		6 - 6 RAC	11772,3	296,8	180,6	-	2,6	0,41	16,0%
Generación III	(Ø = 100)	0 - 0 - 0 RAC	3317,2	194,5	53,5	1,8	-	0,33	18,7%
		0 - 0 - 6 RAC	3283,3	194,6	77,2	2,5	-	0,17	6,9%
		0 - 6 - 0 RAC	3258,7	194,4	66,9	2,2	-	0,12	5,6%
		0 - 6 - 6 RAC	3254,5	195,4	75,8	2,5	-	0,07	2,8%
		6 - 0 - 0 RAC	3313,0	195,3	72,0	2,3	-	0,23	9,8%
		6 - 0 - 6 RAC	3298,2	195,3	79,3	2,6	-	0,18	6,8%
		6 - 6 - 0 RAC	-	-	-	-	-	-	-
6 - 6 - 6 RAC	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 23: Resultados de resistencia a tracción a los 28 días.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

En la generación I y a los 28 días del curado, se puede observar que en el hormigón con fibras se ha obtenido una resistencia a tracción de 3,3MPa. Un 12% mayor que la obtenida en el hormigón sin fibras (2,9MPa).

En la generación II podemos observar que pasa lo contrario, el hormigón sin fibras presenta una mayor resistencia a tracción que los que llevan fibras. Esto es un hecho aislado si comparamos todos los resultados, si miramos la tabla 23 se puede ver claramente que los hormigones que llevan fibras presentan una resistencia mayor si lo comparamos con los sin fibras, precedentes del mismo tipo de árido.

En la generación III, observamos el mismo hecho, los hormigones con fibras presentan una mejor resistencia que los hormigones sin fibras. También podemos observar, el hormigón sin fibras en ninguna de las generaciones anteriores (0-0-0- RAC) presenta una resistencia mucho menor (1,8 MPa) al resto de los hormigones (la mínima es de 2,2 MPa), que el menos llevan fibras en alguna de las generaciones. Esto supone un 19% menos que la mínima del resto y 45% menos que la máxima obtenida.

Analizado los resultados, se puede ver claramente la influencia de las fibras en la resistencia a tracción. Los hormigones con fibras presentan en general, mayor resistencia a tracción que los hormigones sin fibras.

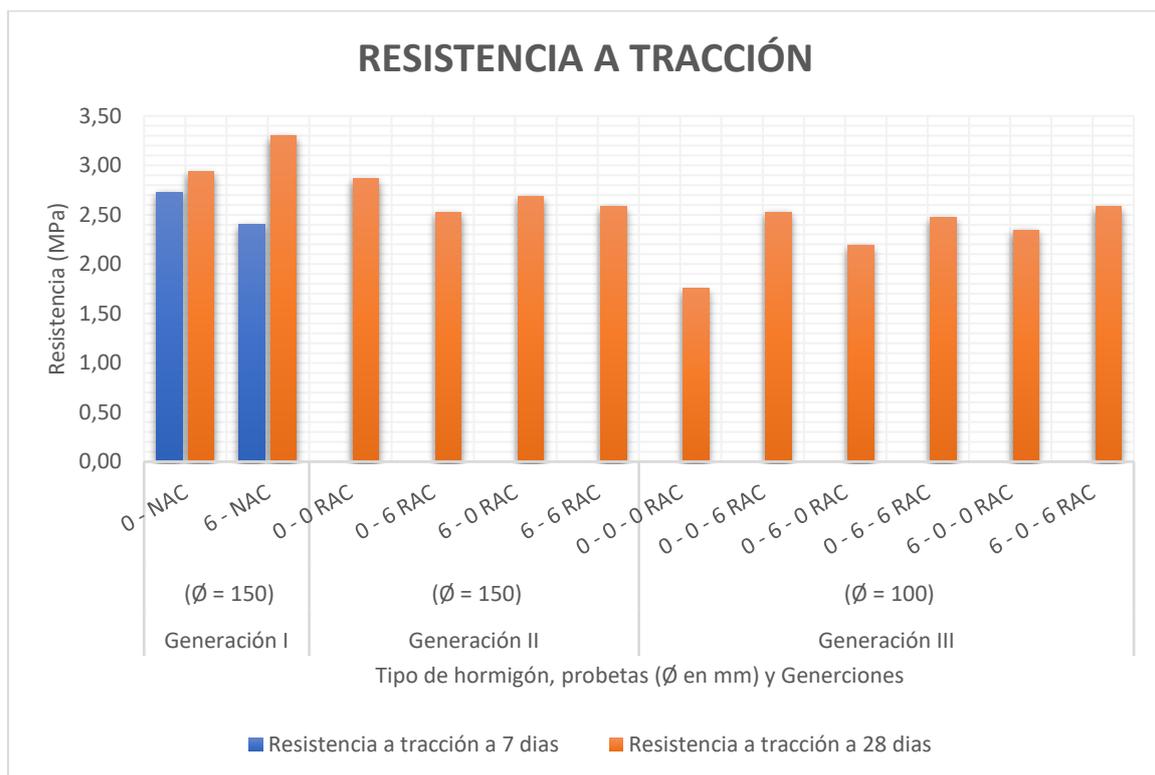


Gráfico 10: Representación de los resultados obtenidos de la resistencia a tracción.

### 4.2.4 Módulo de elasticidad

Como se ha comentado anteriormente, El ensayo de módulo de elasticidad se realiza de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-13:2014. El ensayo consiste en someter la probeta a varios de ciclos de carga de compresión y obtener la deformación que se produce.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

El ensayo se realizó con una carga máxima de 1/3 carga de rotura, dado que esa carga se encuentra en la zona elástica y por lo tanto no habría deformaciones plásticas. El ensayo se realizó tanto para las probetas con edades de curación de 7 días como a 28 días.

Cabe señalar que se ensayaron 3 probetas por cada tipo de hormigón, y que, por falta de material en algunas de las generaciones, las mismas probetas fueron sometidas tanto a 7 días como a 28 días.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 24 y 25 y se representan en la gráfica 11.

Módulo de elasticidad a 7 días									
	probetas	Tipo de hormigón	Peso promedio. (g)	H promedio (mm)	F <sub>MAX</sub> (ciclo) (kN)	Ec (∅ = 100) (MPa)	Ec (∅ = 150) (MPa)	desv. Estand.	CoV (%)
Generación I	(∅ = 150)	0 - NAC	12452,0	296,7	200,0	-	29814,3	1070,0	3,6%
		6 - NAC	12367,2	296,0	200,0	-	29101,3	2304,6	7,9%
Generación II	(∅ = 150)	0 - 0 RAC	11785,0	295,7	158,0	-	23456,3	570,4	2,4%
		0 - 6 RAC	11658,0	296,3	139,0	-	22411,3	488,0	2,2%
		6 - 0 RAC	11794,5	296,5	158,0	-	23927,7	844,9	3,5%
		6 - 6 RAC	11732,3	296,8	158,0	-	22915,0	672,0	2,9%
Generación III	(∅ = 100)	0 - 0 - 0 RAC	3315,7	194,5	46,3	23766,3	-	401,8	1,7%
		0 - 0 - 6 RAC	3282,0	194,6	46,3	23780,7	-	549,1	2,3%
		0 - 6 - 0 RAC	3269,7	194,4	44,0	24096,7	-	313,2	1,3%
		0 - 6 - 6 RAC	3277,7	195,4	44,0	23563,3	-	832,9	3,5%

Tabla 24: Resultados obtenido del módulo de elasticidad a los 7 días.

Módulo de elasticidad a 28 días									
	probetas	Tipo de hormigón	Peso promedio. (g)	H promedio (mm)	F <sub>MAX</sub> (ciclo) (kN)	Ec (∅ = 100) (MPa)	Ec (∅ = 150) (MPa)	desv. Estand.	CoV (%)
Generación I	(∅ = 150)	0 - NAC	12475,5	296,7	223,3	-	34788,7	3405,9	9,8%
		6 - NAC	12404,0	296,0	235,0	-	32500,0	850,0	2,6%
Generación II	(∅ = 150)	0 - 0 RAC	11809,5	295,7	185,0	-	25167,7	350,3	1,4%
		0 - 6 RAC	11685,5	296,3	174,0	-	24219,7	1543,7	6,4%
		6 - 0 RAC	11825,8	296,5	170,0	-	26842,0	2356,2	8,8%
		6 - 6 RAC	11772,3	296,8	170,0	-	24269,0	304,1	1,3%
Generación III	(∅ = 100)	0 - 0 - 0 RAC	3317,2	194,5	58,4	25439,7	-	883,2	3,5%
		0 - 0 - 6 RAC	3283,3	194,6	52,4	24198,3	-	1924,4	8,0%
		0 - 6 - 0 RAC	3258,7	194,4	53,8	24927,7	-	184,0	0,7%
		0 - 6 - 6 RAC	3254,5	195,4	51,6	22396,0	-	265,6	1,2%
		6 - 0 - 0 RAC	3313,0	195,3	50,0	27311,7	-	527,4	1,9%
		6 - 0 - 6 RAC	3298,2	195,3	51,6	25138,7	-	1452,5	5,8%
		6 - 6 - 0 RAC	3340,7	195,3	50,0	27651,3	-	225,5	0,8%
		6 - 6 - 6 RAC	3343,2	195,4	50,0	25652,3	-	774,4	3,0%

Tabla 25: Resultados obtenido del módulo de elasticidad a los 28 días.

En la generación I, al hacer el ensayo a los 7 días, se puede observar que el valor del módulo de elasticidad es ligeramente mayor en el hormigón sin fibras, exactamente un 2% mayor respecto al hormigón con fibras. Esta misma tendencia se observa a los 28 días, pero esta vez la diferencia es de un 6-7%.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

En las generaciones II y III podemos observar la misma tendencia. Si la procedencia del árido es la misma, el valor del módulo de elasticidad es mayor en los hormigones sin fibras. Esto ocurre tanto a los días del ensayo con a los 28 días.

También se puede observar que los valores del módulo de elasticidad bajan a medida que se aumentan los ciclos de reciclaje.

Analizando los datos, se puede concluir que, la adición de las fibras afecta negativamente al módulo de elasticidad, aunque la diferencia es ligera respecto a los que no llevan fibras.

También se puede decir que, al igual que la resistencia a compresión, a medida que se aumentan los ciclos de reciclajes, se disminuyen los valores del módulo de elasticidad, esto puede ser debido a la elevada absorción de agua de los áridos y por lo tanto la disminución de la resistencia.

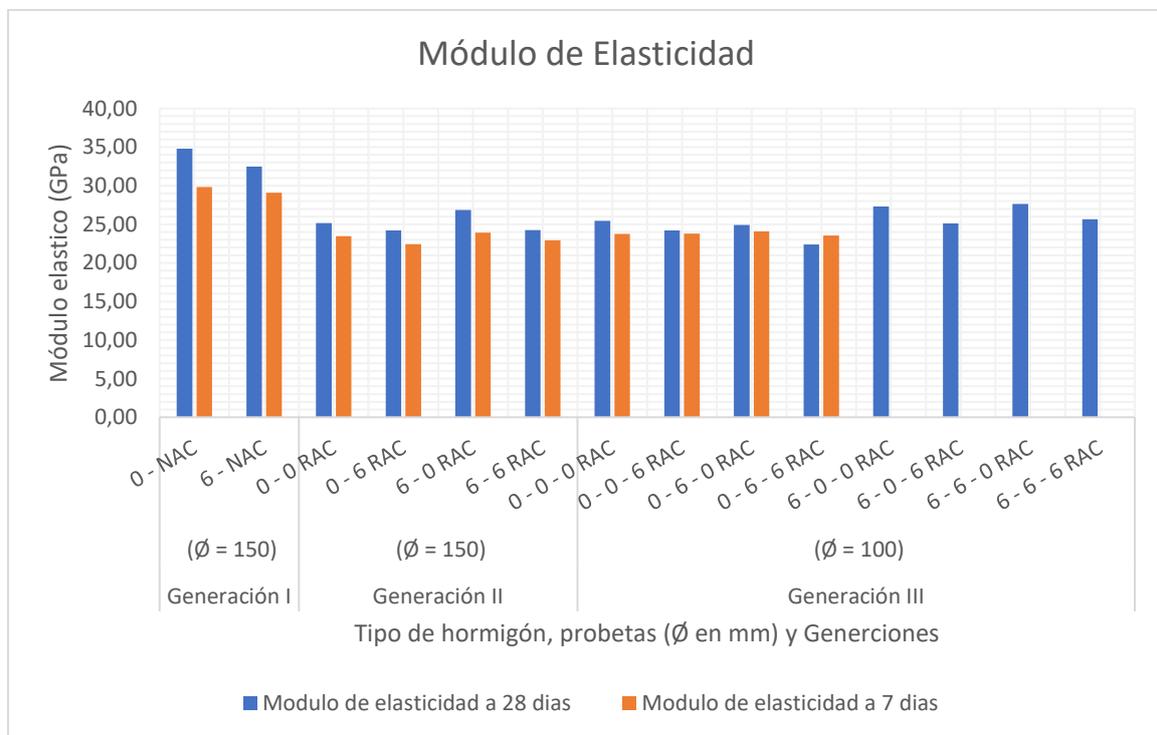


Gráfico 11: Representación gráfica de los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad.

### 4.2.5 Resistencia residual

La resistencia residual del hormigón es uno de los ensayos más importantes de esta tesis. Esta propiedad del hormigón se ha calculado mediante el ensayo Barcelona y de acuerdo con la norma UNE 83515:2010.

El ensayo se ha realizado en todas las generaciones a los 28 días. Se ha hecho 6 ensayos para cada tipo de hormigón menos en 6 - 6 - 0 RAC y 6 - 6 - 6 RAC, donde se han hecho 5 ensayos para cada uno, debido a falta de material.

Una vez realizado el ensayo y obtenidos los resultados, se procede a calcular la resistencia residual. Se calcula mediante la fórmula que se muestra en la figura 38.

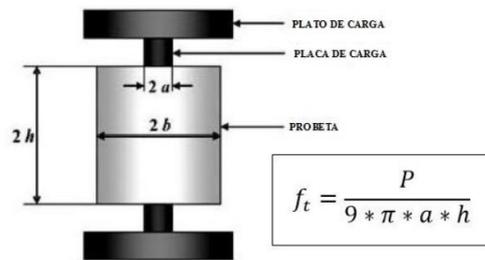


Figura 38: ilustración ensayo Barcelona. Fuente: <https://masqueingenieria.com/blog/ensayos-a-traccion-indirecta-del-hormigon/>

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 26 Y se hace una representan gráficamente en los gráficos 12, 13 y 14.

Resistencia Residual (Ensayo BCN)									
	Tipo de hormigón	Peso promedio. (g)	H promedio (mm)	F <sub>UTIL</sub> (kN)	f <sub>ct</sub> (MPa)	f <sub>0,5</sub> (MPa)	f <sub>1,5</sub> (MPa)	f <sub>2,5</sub> (MPa)	f <sub>3,5</sub> (MPa)
<b>Generación I</b>	0 - NAC	6271,6	150,0	99,5	2,5	-	-	-	-
	6 - NAC	6196,5	150,0	119,0	3,0	1,2	1,0	0,9	0,8
<b>Generación II</b>	0 - 0 RAC	5929,6	150,0	87,6	2,2	-	-	-	-
	0 - 6 RAC	5831,8	150,0	87,1	2,2	0,9	0,7	0,6	0,5
	6 - 0 RAC	5964,7	150,0	93,4	2,3	0,6	0,4	0,3	0,3
	6 - 6 RAC	5933,1	150,0	90,7	2,3	1,2	0,9	0,8	0,7
<b>Generación III</b>	0 - 0 - 0 RAC	5697,0	150,0	74,6	1,9	-	-	-	-
	0 - 0 - 6 RAC	5673,2	150,0	75,5	1,9	0,8	0,6	0,5	0,5
	0 - 6 - 0 RAC	5716,6	150,0	71,2	1,8	0,5	0,3	0,3	0,2
	0 - 6 - 6 RAC	5748,8	150,0	72,4	1,8	1,0	0,8	0,7	0,6
	6 - 0 - 0 RAC	5776,0	150,0	75,7	1,9	0,3	0,2	0,1	0,1
	6 - 0 - 6 RAC	5824,7	150,0	79,1	2,0	0,9	0,8	0,7	0,6
	6 - 6 - 0 RAC	5758,1	150,0	78,7	2,0	0,7	0,5	0,5	0,4
	6 - 6 - 6 RAC	5738,2	150,0	77,6	2,0	1,2	1,1	1,0	0,9

Tabla 26: Resultados obtenidos y calculados de la resistencia residual.

Los hormigones con fibras en todas sus generaciones, los resultados de la resistencia residual son muy similares. Si nos fijamos en 6-NAC, 6 – 6 RAC y 6-6-6 RAC, la resistencia residual a los 30s (f<sub>0,5</sub>) es de 1,2MPa en los 3 casos. A medida que avanzamos en el tiempo podemos observar que varían un poco los resultados. Se puede ver el hormigón 6-6-6 RAC ofrece mayor resistencia, seguido del 6-NAC que es 0,1MPa más baja en todos los casos y, por último 6-6 RAC, que es 0,1MPa menor que 6-NAC.

Los hormigones con que lleven fibras en 2 de sus generaciones y fibras en la última generación son los que tienen mejor comportamiento después de los comentados en el punto anterior. Estos hormigones son 0-6-6 RAC y 6-0-6 RAC, que presentan resistencias residuales iguales.

Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Por último, los hormigones que no llevan fibras en la última generación, pero si la llevan en alguna de sus generaciones, presentan un comportamiento de resistencia residual, aunque es muy por debajo de los comentados anteriormente.

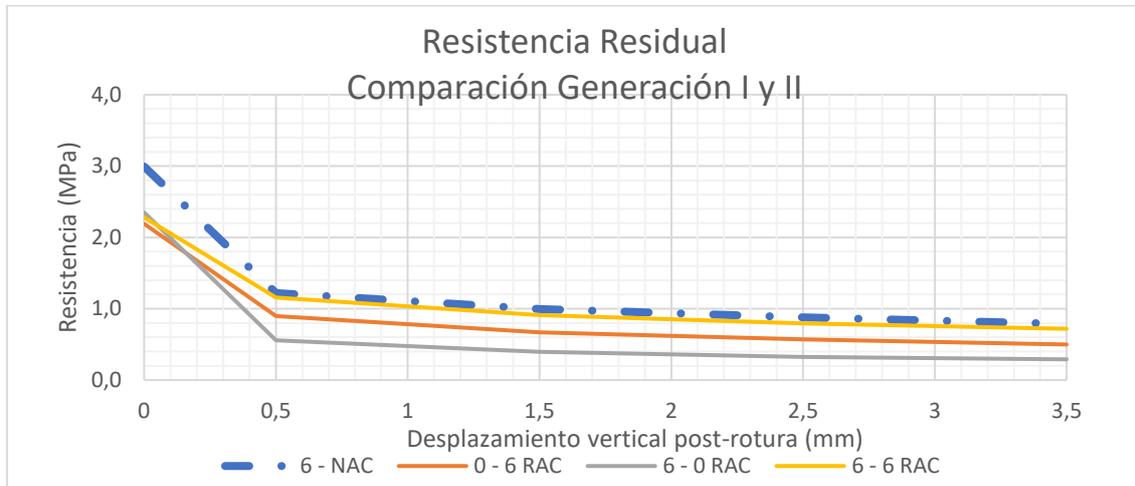


Gráfico 12: Resistencia residual; comparación generación I y II.

En la gráfica 12 Podemos observar y comparar las resistencias de la generación I con la generación II. Se puede ver que 6-NAC tiene mayor resistencia que la generación II. El hormigón 6-6 RAC, presenta un comportamiento y una resistencia residual muy similar al 6-NAC.

También podemos que 6-0 RAC, tiene resistencia residual muy menor al resto. Eso es debido a, aunque no lleve fibras en la última generación, los áridos si llevan fibras al ser procedentes del 6-NAC.

En el caso del 0-6 RAC, al llevar fibra en la última generación, presenta una resistencia residual mejor que 6-0 NAC, pero peor que la 6-6 RAC y eso es debido a que lleva menos fibras que 6-6 RAC. 6-6 RAC lleva fibras tanto en los áridos como fibras adicionales.

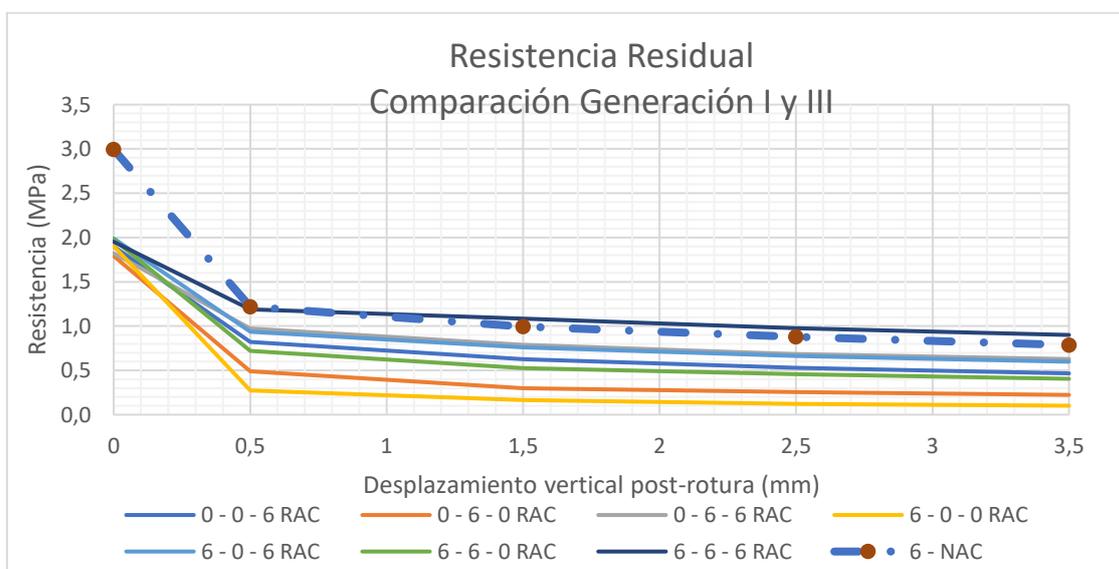


Gráfico 13: Resistencia residual; comparación generación I y III.

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

Si comparamos la generación I con la III. Podemos ver en general la generación se comporta mejor o tiene una mayor resistencia que la generación III excepto en caso del hormigón 6-6-6 RAC, que presenta resistencia una resistencia residual ligeramente mayor que 6-NAC. Esto puede ser debido a la cantidad de fibras. El hormigón 6-6-6 RAC, lleva acumulando fibras en los áridos de las 2 últimas generaciones mientras que 6-NAC no lleva fibras acumuladas en los áridos.

Se puede observar que los hormigones 0-6-6 RAC y 6-0-6, presentan resistencias iguales. Dado que las características son similares, fibras en la ultima generación y fibras en una de las generaciones anterior, el resultado era de esperar.

Los hormigones 0-6-0 RAC y 6-0-0 RAC presentan una resistencia residual muy menor al resto. Este comportamiento era de esperar debido a que no lleva fibras en la última generación, pero si la llevan los áridos, que son procedentes de hormigones con fibras en alguna de sus generaciones.

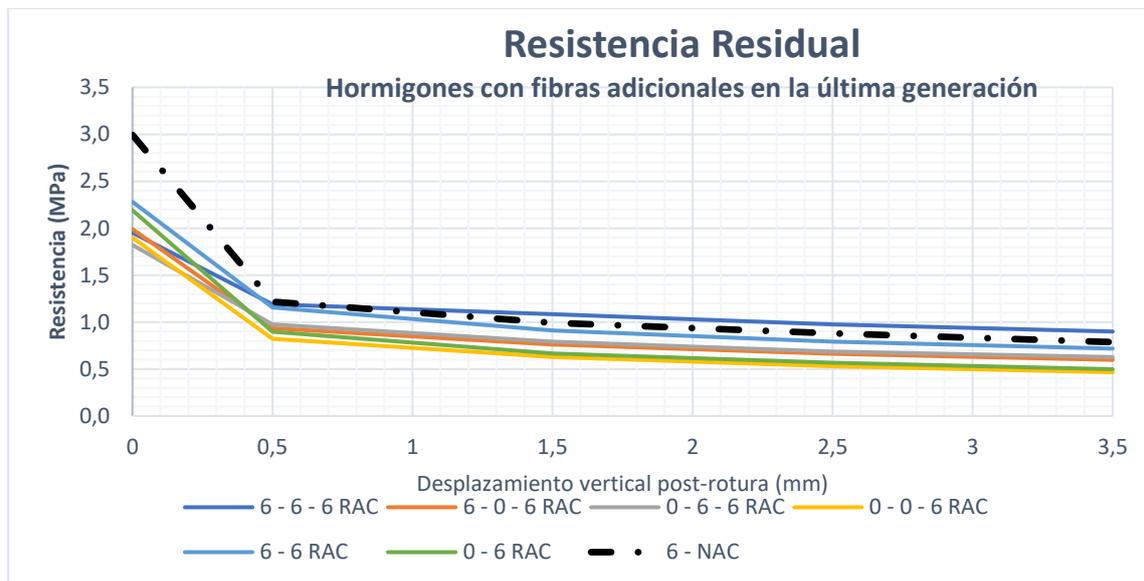


Gráfico 14: Resistencia residual de todas las generaciones.

## Capítulo 5

### 5. Conclusiones

#### 5.1 Caracterización de los áridos

Respecto al reciclaje y tasa de recuperación de los áridos, se ha observado que las pérdidas del material son menores en hormigones sin fibras respecto a los hormigones con fibras.

Haciendo una comparación por tipos de hormigón, se puede observar que, los hormigones que no llevan fibras en ninguna de las generaciones, el porcentaje de los áridos reciclados se baja del 74% (NAC – 0) al 67% (0 – 0 RAC). Comprando estos resultados con los hormigones que no llevan fibras en la última generación, se puede observar que el porcentaje del árido reciclado baja hasta el 60% (6-0 RAC).

Se puede observar que en los hormigones con fibras el porcentaje de las pérdidas, en la mayoría, se sitúa por encima del 30% e incluso llegando hasta el 34%. Mientras que, en los hormigones sin fibras, la tasa varía entre 23% -25%. Esto se debe a la partición de las probetas en 2 trozos para luego poder hacer la trituración. Dicha partición se hacía mediante maceta y clavo, y al ser un hormigón con fibras era más complicado romper las probetas.

Los porcentajes de pérdidas se podrían mejorar utilizando un equipo con mayor capacidad, donde la partición de las probetas previo a la trituración no sea necesario.

A medida que se aumentan los ciclos de reciclajes, los áridos reciclados presentan unas peores características. La absorción de los áridos aumenta y densidad disminuye a medida que se aumentan los ciclos de reciclajes. La absorción aumenta entre 5-6% en la generación II respecto a los áridos naturales. Y un 7-9% en la generación III respecto a los áridos naturales. Por otro lado, la densidad de la generación II disminuye entre 11-13% respecto a los áridos naturales, mientras que en la generación III disminuye entre 19-20% respecto a los áridos naturales.

Esto se debe a, cada vez obtenemos áridos con mortero adherido o directamente áridos de mortero y que por lo tanto son muy porosos y en consecuencia tenemos una absorción mayor y una menor densidad, y, por lo tanto, áridos de peor calidad.

La cuantía de fibras sueltas en el los áridos han sido del 44% al 64% del contenido del hormigón del que procede, mientras que las de fibras incrustadas han sido aproximadamente del 30%. Se ha observado que el contenido de fibras sueltas en el hormigón es mayor en los áridos 4/12mm comparado con los áridos 12/20mm, en cambio el contenido de fibras incrustadas es mayor en los áridos grandes 12/20mm. Esto puede ser debido a la adherencia del mortero al árido. Cuanto mayor es el árido menos fibras sueltas, pero más cantidad de fibras adheridas, mientras si el áridos el de menor tamaño, habrá menos mortero adherido. Lo que lleva a que puede haber menos fibras incrustadas en el árido y más fibras sueltas o libres en los áridos.

Los resultados obtenidos mediante la técnica de quema o incineración no son representativos, por lo que se debe estudiar más a fondo para mejorar la técnica o desarrollar otros métodos más efectivos y representativos.

## 5.2 Caracterización del hormigón

Respecto a la consistencia del hormigón, hay que destacar que la mayoría de los hormigones entraban dentro del límite establecido, es decir, un asiento del cono de Abraham de  $125\text{mm} \pm 25\text{mm}$ . En los casos 6-6 RAC y 6-6-6 RAC utilizando el aditivo, el asiento fue del 80mm y 10mm respectivamente. Esto se debe al efecto de cosido de las fibras. A simple vista la amasada parecía bastante líquida, pero al hacer el cono de Abraham, la consistencia salía seca, aunque no fuera el caso.

Respecto a la resistencia a compresión, el hormigón estaba diseñado para una resistencia inicial de 35MPa. El hormigón cumplió para lo que estaba diseñado dado que las resistencias resultantes de la generación I han sido de 40,2MPa y 40MPa para 0-NAC y 6-NAC respectivamente. A medida que se aumentan los ciclos de reciclajes, disminuye la resistencia a compresión. Las resistencias medias (a los 28 días) han sido de 40,1MPa, 29MPa y 24,5MPa de la generación I, II y III respectivamente. Esto supone una bajada de 27,68% de la generación II respecto la generación I. y una bajada de resistencia de 38,71% de la generación III respecto la generación I. A los 7 días del curado, tiene un peor comportamiento, dado que las bajadas respecto a la generación I son 24,47% y 45,42%, de la generación II y III respectivamente.

Estas bajadas de resistencia son debido a la calidad del árido y la cantidad del agua. Al ser un árido con mortero adherido o árido de mortero, la resistencia es menor y una absorción mayor. Al ser poroso necesita más agua, lo que influye en la resistencia dado que la cantidad de cemento por  $\text{m}^3$  es la misma ( $350\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

También hay que destacar y como era de esperar, las fibras no influyen en la resistencia a compresión. No se ha observado un aumento o disminución de la resistencia a compresión de los hormigones con fibras respecto a los sin fibras.

En la resistencia a tracción se puede observar una clara influencia de las fibras. Los hormigones que proceden del mismo tipo de árido presentan un mejor comportamiento (mayor resistencia a tracción) los que llevan fibras respecto a los que no llevan fibras. En la generación I, la diferencia ha sido del 12% del hormigón con fibras respecto al sin fibras, que tienen unas resistencias a tracción del 3,3MPa y 2,9MPa respectivamente.

En la generación III, las resistencias de los hormigones sin fibras son menores un 11% mínimo. La máxima diferencia se encuentra en los hormigones 0-0-0 RAC y 0-0-6 RAC, que

## Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado.

presentan unas resistencias a tracción del 1,8MPa y 2,5MPa, respectivamente. Esto se traduce en una diferencia del 28%.

También se ha observado un caso excepcional, donde la resistencia del hormigón sin fibras es mayor que el hormigón con fibras. Esto pasa en la generación II y los hormigones 0-0 RAC y 0-6 RAC.

Analizado los resultados se concluye, una evidente influencia de las fibras en la resistencia a tracción. Los hormigones con fibras presentan, en general, mayor resistencia a tracción que los hormigones sin fibras.

Analizando los datos, se observa un comportamiento del hormigón muy similar en a la resistencia a compresión y módulo de elasticidad. Se puede observar claramente la no influencia de las fibras en los resultados. Como pasaba en la resistencia a compresión, a medida que aumentan los ciclos de reciclajes, el comportamiento elástico del hormigón baja. Por lo tanto, se concluye que el comportamiento elástico del hormigón va acompañada a la calidad de árido y por lo tanto a la resistencia del hormigón.

La resistencia residual se produce debido a la incorporación de fibras en el hormigón. Esta resistencia es producida por la calidad de fibras (resistencia de fibras) y su adherencia en el hormigón. En los resultados obtenidos, se puede observar que el hormigón que más acumula fibras (aunque sea un hormigón de la generación III) presenta un mejor comportamiento después de la rotura a tracción que la generación I (6-NAC).

También se observa que los hormigones que no llevan fibras, pero si los áridos que lo compone, presenta un comportamiento a post rotura.

## **Bibliografía**

- **M.kunieda, N.Ueda, H.Nkamura, (2014)** - Ability of recycling on fiber reinforced concrete.
- **J. Eiras-López, S. Seara-Paz, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella,** Bond behaviour of recycled concrete. Analysis and prediction of bond stress-slip curve., J. Mater. Civ. Eng. (2017).
- **Hansen T. C. (1992)** - "*Recycling of Demolished Concrete and Masonry*". London, UK, E & FN Spon.
- **Barra M.; Vázquez E. (1998)** - "*Properties of concretes with recycled aggregates: Influence of properties of the aggregates and their interpretation*". Presented at the International Symposium on Sustainable construction: Use of recycled concrete aggregate, London, UK, pp. 19-30.
- **Bazaz J. B.; Khayati M.; Akrami N. (2006)** - "*Performance of concrete produced with crushed bricks as the coarse and fine aggregate*". The Geological Society of London, 10 p.
- **Khalaf F. M. (2006)** - "*Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete*". Journal of Materials in Civil Engineering, 18(4), pp. 518-526
- **RILEM (1994)** - "*Specifications for concrete with recycled aggregates*". Materials and Structures, 27(173), pp. 557-559.
- **EN-12620 (2013)** - "*Aggregates for concrete*". Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium, 56 p.
- **R.V. Silva (2015)** - "*Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in the production of structural concrete*".
- **Dhir R. K.; Paine K. A. (2004)** - "*Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high strength concrete*". Presented at the 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management, Singapore, pp. 108-123.
- **Xiao J. Z.; Li J.; Zhang C. (2005)** - "*Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading*". Cement and Concrete Research, 35(6), pp. 1187-1194.
- **Hansen T. C.; Boegh E. (1985)** - "*Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete*". Journal of the American Concrete Institute, 82(5), pp. 648-652.
- **Limbachiya M. C.; Leelawat T.; Dhir R. K. (1998)** - "*RCA concrete: a study of properties in the fresh state, strength development and durability*". Presented at the International Symposium on Sustainable construction: Use of recycled concrete aggregate, London, UK, pp. 227-237.
- **TFSCCS (2004)** - "*Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete (Task Force of the Standing Committee of*".

- Concrete of Spain*". Presented at the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, Spain, pp. 511-525.
- **Dhir R. K.; Paine K. A. (2004)** - "*Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high strength concrete*". Presented at the 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management, Singapore, pp. 108-123.
  - **Dhir R. K.; Limbachiya M. C.; Leelawat T. (1999)** - "*Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes*". Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, 134(3), pp. 257-274.
  - **Frondistou-Yannas S. (1977)** - "*Waste concrete as aggregate for new concrete*". Journal of the American Concrete Institute, 74(8), pp. 373-376.
  - **Adams, M.P., Fu, T., Cabrera, A.G., Morales, M., Ideker, J.H., Isgor, O.B., 2016.** *Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates.* Constr.Build. Mater. 102, 802–810.
  - **Eurostat, 2017.** *Generation of Waste-by-Waste Category, Hazardousness and NACE Rev 2 Activity.*
  - **J.L. Gálvez-Martos, D. Styles, H. Schoenbergerd, B. Zeschmar-Lahle. 2018** *Construction and demolition waste best management practice in Europe*, Resources, Conservation & Recycling.
  - **V. W.Y. Tam, M. Soomro, A. Catarina, J. Evangelista, A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)** Construction and Building Materials.
  - **N. Tošić, J.M. Torrenti, T. Sedran, I. Ignjatovic (2020).** *Toward a codified design of recycled aggregate concrete structures: Background for the new fib Model Code 2020 and Eurocode 2.*
  - **Blengini, G.A., Garbarino, E., 2010.** *Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix.* J. Clean. Prod. 18, 1021–1030.
  - **R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review, Eur. J. Environ. Civ. Eng. 19 (2015) 825–849**
  - **Adams, M.P., Fu, T., Cabrera, A.G., Morales, M., Ideker, J.H., Isgor, O.B., 2016.** *Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates.* Constr.Build. Mater. 102, 802–810.
  - **Jiménez, J.R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J.M., de Brito, J., 2013.** *Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing.* Constr. Build. Mater.
  - **Joint Research Centre - European Commission, 2012.** *Best Environmental Management Practice in the Building and Construction Sector. Final Draft.*

- **R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir**, *Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: a review*, J. Clean Prod. 143 (2017) 598–614.
- **M. Wijayasundara, R.H. Crawford, P. Mendis**, *Comparative assessment of embodied energy of recycled aggregate concrete*, J. Clean. Prod. 152 (2017).
- **Proyecto GEAR (GERD 2012)**. GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).
- **Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero**, *por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*.
- **COMISION EUROPEA (2014)** OPORTUNIDADES PARA UN USO MÁS EFICIENTE DE LOS RECURSOS EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.
- **European Union. Directive 2008/98/EC** of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives. 2008. doi:2008/98/EC. 32008L0098.
- **Fomento M. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), 2008**,
- **AENOR. UNE EN 12620-2003**, *Aggregates for Concrete*, Asociación Española de Normalizacion, Spain, 2003.
- **I. Haider, B. Cetin, Z. Kaya, M. Hatipoglu, A. Cetin, H.A. Ahmet**, *Evaluation of the Mechanical Performance of Recycled Concrete Aggregates Used in Highway Base Layers*, Geo-Congress 2014, Tech Pap, 2014, 3686–2594, doi: 10.1061/9780784413272.357.
- **P.K. Kolay, M. Akentuna**, *Characterization and utilization of recycled concrete aggregate from illinois as a construction material*, Geo-Congress 2014 Tech Pap, 2014, 3570–3561, doi: 10.1061/9780784413272.345.
- **A. Barbudo, F. Agrela, J. Ayuso, J.R. Jiménez, C.S. Poon**, *Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications*, Constr. Build. Mater. 28 (2012) 129–138.
- **R. Nassar, P. Soroushian**, *Use of recycled aggregate concrete in pavement construction*, J. Solid Waste Technol. Manage. 42 (2016)
- 
- <https://www.sorresigravesegara.com/>
- <https://www.btbab.com/>
- <https://www.tracex.eu/>
- <https://www.ihobe.eus/inicio>
- <https://aridoscasa.com/>