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

Investigación experimental sobre los efectos del uso de árido reciclado y fibra reciclada en hormigón reforzado con fibras

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Trabajo realizado por:

Gabriela Rivadeneira Escobar

Dirigido por:

Nikola Tošić

Albert de la Fuente Antequera

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, mayo 2024

Escuela de Ingeniería Civil

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis tutores Nikola Tošić y Albert de la Fuente por permitirme ser parte de este proyecto y guiarme durante todo el proceso. También agradezco a Liu Guanzhi por sus enseñanzas, comprensión y paciencia durante y después de la campaña experimental.

A mis padres Sonia y Carlos, quienes siempre me han brindado su apoyo desde el otro lado del mundo y por quienes estoy ahora aquí, y agradezco a mi hermano Carlitos, que siempre ha sido mi gran inspiración y mi ejemplo para seguir.

A mis amigos en Barcelona, en especial a Camilo y Giulli, quienes se convirtieron en mi segunda familia, me brindaron todo su apoyo y con quienes compartí grandes anécdotas durante todo el proceso que fue el máster.

RESUMEN

El sector de la construcción ha experimentado un crecimiento notable durante los últimos años. Fenómeno que ha conllevado un incremento en la generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), llegando a representar más de un tercio del total de residuos generados en Europa (Eurostat, 2020), encontrándose España en el quinto lugar entre los países con mayor generación de RCD del continente (Ministerio de Medio Ambiente, 2015). Una solución que ha ido tomando fuerza y relevancia para gestionar esta clase de residuos y dar frente a la problemática, ha sido la valorización y posterior reciclaje de este tipo de materiales, que, a pesar de ser un tema ya bastante desarrollado en algunos países de la Unión Europea, aún presenta deficiencias, desde el estudio y la investigación, hasta la ejecución.

El hormigón reforzado con fibras es una mezcla de cemento hidráulico, áridos y fibras de refuerzo dispersas de manera aleatoria, provenientes de materiales como acero, vidrio y polímeros orgánicos (American Concrete Institute, 2019). Se trata de un material actualmente muy utilizado y ampliamente aceptado por varios códigos estructurales debido a sus beneficios en términos estructurales, de durabilidad y costos. Sin embargo, a pesar de los numerosos análisis existentes sobre el comportamiento de este tipo de hormigón, se evidencia una deficiente investigación sobre la fase post - servicio de este material y, por consiguiente, de estrategias de tratamiento o reutilización.

Como aporte a dicho campo de investigación poco desarrollado, esta tesis pretende analizar el efecto de utilizar árido reciclado y fibras recicladas para la fabricación de nuevo hormigón reforzado con fibras. Para ello se plantea una campaña experimental con 3 tipos de hormigón: hormigón con árido natural (NA) y fibras nuevas (hormigón primario), hormigón con árido reciclado con fibras adheridas (RAF) y fibras nuevas y hormigón con árido natural (NA) y fibras recicladas. Utilizando un contenido de fibras de 3 y 9kg/m^3 para cada tipo de hormigón.

Una vez finalizada la campaña experimental, se concluye que la utilización de árido reciclado con fibras adheridas a su superficie (RAF), a pesar de producir una disminución no significativa de la resistencia a compresión del hormigón, puede dar lugar a nuevos hormigones con resistencia mayor a 30MPa, por otro lado, la utilización de fibras recicladas no representa influencia significativa en la resistencia a compresión del hormigón. En cuanto al módulo de elasticidad, se concluye que la utilización de este tipo de árido (RAF) produce una disminución del módulo de elasticidad de hasta el 22%, mientras que la incorporación de fibras recicladas no representa una influencia significativa. Respecto a la resistencia residual, se llega al aporte colateral de las fibras adheridas al árido reciclado en la fase post – fisuración del hormigón y al efecto negativo de la utilización de fibras recicladas por su desgaste y menor desempeño en el cosido después de la fisuración.

ABSTRACT

The construction sector has experienced a remarkable growth in recent years. This phenomenon has led to an increase in the generation of Construction and Demolition Waste (CDW), representing more than a third of the total waste generated in Europe (Eurostat, 2020), with Spain in fifth place among the countries with the highest generation of CDW on the continent (Ministerio de Medio Ambiente, 2015). A solution that has been gaining strength and relevance to manage this kind of waste and face the problem, has been the recovery and subsequent recycling of this type of materials, which, despite being a topic already quite developed in some countries of the European Union, continues to have shortcomings, from the study and research to the execution.

Fiber-reinforced concrete is a mixture of hydraulic cements, aggregates, and randomly dispersed reinforcement fibers from materials such as steel, glass and organic polymers (American Concrete Institute, 2019). It is a material currently widely used and widely accepted by several structural codes due to its benefits in terms of structural, durability and cost. However, despite the numerous existing analyses on the behavior of this type of concrete, there is evidence of a deficient research on the post-service phase of this material and consequently, of treatment or reuse strategies.

As a contribution to this underdeveloped research field, this thesis aims to analyze the effect of using recycled aggregate and recycled fibers for the manufacture of new fiber-reinforced concrete. For this purpose, an experimental campaign is proposed with 3 types of concrete: concrete with natural aggregate (NA) and new fibers (primary concrete), concrete with recycled aggregate with bonded fibers (RAF) and new fibers, and concrete with natural aggregate (NA) and recycled fibers. Using a fiber content of 3 and 9kg/m^3 for each type of concrete.

Once the experimental campaign was completed, it was concluded that the use of recycled aggregate with fibers adhered to its surface (RAF), despite producing a non-significant decrease in the compressive strength of concrete, can give rise to new concretes with a strength greater than 30MPa; on the other hand, the use of recycled fibers does not represent a significant influence on the compressive strength of concrete. Regarding the modulus of elasticity, it is concluded that the use of this type of aggregate (RAF) produces a decrease in the modulus of elasticity of up to 22%, while the incorporation of recycled fibers does not represent a significant influence. Regarding the residual strength, the collateral contribution of the fibers adhered to the recycled aggregate in the post-cracking phase of the concrete and the negative effect of the use of recycled fibers due to their wear and lower performance in the stitching after cracking.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Objetivo general 2
1.2. Objetivos específicos 2
2. ESTADO DEL ARTE 3
2.1. Residuos de Construcción y Demolición (RCD) 3
2.2. Generación de Residuos de Construcción y Demolición en Europa y España 4
2.2.1. Reciclaje y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición 5
2.2.2. Marco regulador de la gestión de RCD 7
2.3. Árido reciclado 7
2.3.1. Clasificación 8
2.3.2. Propiedades 9
2.4. Hormigón con árido reciclado (ARH) 10
2.4.1. Generalidades y limitaciones 10
2.4.2. Composición 11
2.4.3. Propiedades en estado fresco 11
2.4.4. Propiedades mecánicas 12
2.6. Hormigón reforzado con fibras poliméricas (polipropileno) 16
2.6.1. Generalidades 16
2.6.2. Propiedades en estado fresco 17
2.6.3. Propiedades mecánicas 17
2.6.4. Durabilidad 19
2.6.5. Reciclaje de hormigón reforzado con fibras 19
3. METODOLOGÍA Y MATERIALES 22
3.1. Campaña experimental 22
3.2. Materiales 23
3.2.1. Cemento 23
3.2.2. Árido natural 23
3.2.3. Árido reciclado 25
3.2.4. Fibras 25
3.2.5. Aditivo 26
3.3. Caracterización del hormigón 26
3.3.1. Evaluación del hormigón en estado fresco 26
3.3.2. Ensayos del hormigón en estado endurecido 27

3.4. Diseño de las dosificaciones 30
3.5. Fabricación 30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 31
4.1. Proceso de trituración 31
4.2. Caracterización del árido reciclado 32
4.2.1. Distribución de tamaño 32
4.2.2. Clasificación 32
4.2.3. Granulometría 33
4.2.4. Contenido de finos, absorción y densidad 34
4.3. Contenido de fibras 35
4.4. Caracterización del hormigón 35
4.4.1. Consistencia en estado fresco 35
4.4.2. Caracterización en estado endurecido 36
5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 44
5.1. Introducción 44
5.2. Caracterización del árido reciclado 45
5.3. Recuperación de fibras 45
5.4. Propiedades del hormigón 45
BIBLIOGRAFÍA 48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición general de los Residuos de Construcción y Demolición (Gálvez, Styles, Schoenberger, & Zeschmar-Lahl, 2018) 4
Tabla 2. Propiedades generales de fibras de polipropileno comerciales (American Concrete Institute, 2019) 16
Tabla 3. Definición de fases de la campaña experimental 23
Tabla 4. Propiedades del árido natural (NA) 24
Tabla 5. Propiedades de las fibras de polipropileno (Master Builders Solutions) 26
Tabla 6. Propiedades del aditivo plastificante MasterPozzolith 7003 (Master Builders Solutions, 2021) 26
Tabla 7. Dosificaciones de los diferentes tipos de hormigón analizados 30
Tabla 8. Porcentaje de masa pasante en los diferentes tamaños de tamiz para el árido natural (NA) y para el árido reciclado con fibras embebidas (RAF) 34
Tabla 9. Propiedades de árido reciclado 35
Tabla 10. Resultados de cuantificación de fibras libres recuperadas 35
Tabla 11. Resultados de asentamiento del hormigón por ensayo de cono de Abrams 36
Tabla 12. Resultados de resistencia a compresión del hormigón a 28 días de curado 36
Tabla 13. Resultados de módulo de elasticidad del hormigón 37
Tabla 14. Resultados promedio de resistencia residual a tracción del hormigón 41
Tabla 15. Resistencia residual característica del hormigón 43
Tabla 16. Clasificación de la resistencia post - fisuración del hormigón 43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación de residuos según la actividad económica en la Unión Europea en 2020 (Eurostat, 2020) 5
Figura 2. Distribución por CCAA de la generación de RCD en España, año 2005 5
Figura 3. Tratamiento de la fracción mineral de los Residuos de Construcción y Demolición en el 2014 (Gálvez, Styles, Schoenberger, & Zeschmar-Lahl, 2018) 6
Figura 4. Comparación de la producción de áridos totales frente a la de áridos reciclados de algunos países europeos en el 2015 (Tam, Soomro, Catarina, & Evangelista, 2018) 8
Figura 5. Tipos de áridos reciclados. a) Árido reciclado procedente de hormigón (ARH) (Redecan, s.f.) b) Árido reciclado cerámico (ARC) (GRV Ambient, s.f.) c) Árido reciclado mixto (ARM) (Redecan, s.f.) 9
Figura 6. Comparación composición hormigón convencional vs. Hormigón con árido reciclado. a) Matriz de hormigón convencional b) Matriz de hormigón con árido reciclado (Laserna, 2015) 11
Figura 7. Resistencia a compresión de hormigones con 0%, 25% y 100% de sustitución con árido reciclado (Pavón, Etxeberría, & Martínez, 2011) 13
Figura 8. Influencia en la resistencia a tracción del incremento del contenido de árido grueso reciclado procedente de hormigón (RCA) y árido reciclado mixto (MRA) (Silva, de Brito, & Dhir, 2014) 14
Figura 9. Efecto en el módulo de elasticidad del hormigón de la incorporación de árido reciclado en diferentes porcentajes (Silva, de Brito, & Dhir, 2015) 15
Figura 10. Macro - fibras (izquierda) y micro - fibras (derecha) de polipropileno (Berríos, 2014) 16
Figura 11. Efecto de cosido alcanzado por la adición de fibras en el hormigón 18

Figura 12. Comparación de las curvas Carga-Deformación para hormigón reforzado con fibras de polipropileno (American Concrete Institute, 2019)..... 18
Figura 13. Aparición de fisuras secundarias en el hormigón reforzado con fibras (Pujadas, 2008) 19
Figura 14. Mecanismo de falla en mortero por la presencia de fibras (Kunieda, Ueda, & Nakamura, 2014)..... 20
Figura 15. Resistencia residual de hormigones preparados con 6kg/m3 de fibras de polipropileno nuevas (Tošić, et al., 2022). 21
Figura 16. Resistencia residual de hormigones preparados con 0kg/m3 de fibras de polipropileno nuevas (Tošić, et al., 2022). 21
Figura 17. Esquema de desarrollo de campaña experimental 23
Figura 18. Árido natural utilizado (NA). a) 4/12mm b) 12/20mm..... 24
Figura 19. Granulometría árido natural (NA) 24
Figura 20. Trituradora de mandíbula..... 25
Figura 21. Fibras de polipropileno utilizadas..... 25
Figura 22. Ensayo del cono de Abrams..... 27
Figura 23. Ensayo cálculo módulo de elasticidad del hormigón..... 27
Figura 24. Diagrama para cálculo del módulo de elasticidad del hormigón (Asociación Española de Normalización, 2013) 28
Figura 25. Ensayo de resistencia a compresión del hormigón 28
Figura 26. Ensayo de resistencia residual a tracción por flexión del hormigón..... 29
Figura 27. Proceso adoptado para la recuperación de fibras recicladas libres. a) Material triturado sumergido en agua b) Fibras recicladas libres recuperadas..... 29
Figura 28. Clasificación de forma de fibras recicladas recuperadas 29
Figura 29. Fabricación y curado del hormigón. a) Mezcladora 35 litros utilizada para la fabricación del hormigón b) Cámara húmeda utilizada para el curado del hormigón 30
Figura 30. Distribución de tamaño del árido reciclado generado..... 32
Figura 31. Árido reciclado sin fibras embebidas (RA). a) 4/12mm b) 12/20mm 32
Figura 32. Árido reciclado con fibras embebidas (RAF). a) 4/12mm b) 12/20mm 33
Figura 33. Representación de árido reciclado con fibras embebidas (RAF) y fibras libres..... 33
Figura 34. Curva granulométrica del árido natural (NA) y del árido reciclado con fibras embebidas (RAF) 34
Figura 35. Resultados de resistencia a compresión del hormigón a 28 días 37
Figura 36. Resultados de módulo de elasticidad del hormigón..... 38
Figura 37. Curva tensión - deformación ($\sigma - \varepsilon$). a) 3kg/m^3 b) 9kg/m^3 39
Figura 38. Curva tracción - deformación ($f_{R,j}$-CMOD) por ensayo de tracción por flexión a) 3kg/m^3 b) 9kg/m^3 40
Figura 39. Sistema de conteo de fibras después de ensayo de resistencia residual a la tracción por flexión 41
Figura 40. Relación entre número de fibras y resistencia residual a la tracción por flexión a) f_{LOP} b) f_{R3} 42

1. INTRODUCCIÓN

En España, el uso de hormigón reciclado para la producción de nuevo hormigón ha emergido como una estrategia preferencial y efectiva en la búsqueda de soluciones sostenibles para la industria de la construcción. Este enfoque innovador responde a la creciente conciencia ambiental y la necesidad de reducir la huella de carbono asociada con la producción de materiales de construcción.

El hormigón reciclado, obtenido a partir del procesamiento de residuos de construcción y demolición, ofrece una alternativa viable al hormigón convencional. Al reincorporar estos materiales en el ciclo de vida de la construcción, se minimiza la extracción de recursos naturales y se reduce la cantidad de residuos enviados a vertederos, contribuyendo así a la economía circular.

Este enfoque no solo ofrece beneficios ambientales, sino también económicos, al reducir los costos asociados con la adquisición de materias primas vírgenes y el manejo de residuos. Además, estudios han demostrado que el hormigón reciclado conserva propiedades similares al hormigón convencional, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones en la construcción civil.

Sin embargo, para maximizar su potencial, es fundamental promover políticas que fomenten la adopción de este tipo de prácticas en toda la industria. Con el impulso y la investigación adecuada, el uso de hormigón reciclado podría convertirse en la clave para

una construcción más sostenible en España, contribuyendo significativamente a la mitigación del impacto ambiental y al desarrollo de un sector más responsable y eficiente.

En la actualidad, son numerosos los estudios sobre el tratamiento de hormigón convencional para la generación de árido reciclado y la fabricación de nuevo hormigón. Sin embargo, la fase post - servicio del hormigón reforzado con fibras (sean estas metálicas o sintéticas), aún es un tema poco conocido a pesar de ser un material ya muy utilizado en la industria e incluso reconocido por varios códigos estructurales.

El presente documento pretende cubrir una parte de dicho campo donde aún la investigación es escasa. La campaña experimental realizada se centra en los efectos del uso de árido reciclado grueso y fibra reciclada de polipropileno (fibras sintéticas) en la fabricación de nuevo hormigón reforzado con fibras. Se evalúan las propiedades del árido reciclado generado, y las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras fabricado a partir de los materiales reciclados antes mencionados.

1.1. Objetivo general

El **objetivo principal** del presente estudio es evaluar y cuantificar el **efecto del uso de árido reciclado y fibras** recicladas de polipropileno en las propiedades de un nuevo **hormigón reforzado con fibras** fabricado a partir de dichos materiales.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar una **campaña experimental** con 3 tipos de hormigón: hormigón con árido natural (NA) y fibras nuevas (hormigón primario), hormigón con árido reciclado con fibras adheridas (RAF) y fibras nuevas y hormigón con árido natural (NA) y fibras recicladas. Utilizando un contenido de fibras de 3 y 9kg/m^3 para cada tipo de hormigón.
- Evaluar las **propiedades del árido reciclado** producto de la trituración de un hormigón primario.
- Analizar el **proceso y tasa de recuperación de fibras** del hormigón triturado.
- Comparar las **propiedades mecánicas** (resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia residual) **del hormigón** fabricado **con los materiales reciclados** mencionados y evaluar el efecto de cada uno de ellos.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Se define a los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como los residuos procedentes de obras de excavación, nueva construcción, reparación, remodelación, rehabilitación y demolición ya sea de caminos, aeropuertos, vías o cualquier estructura de edificación. Estos residuos son considerados inertes, ya que no sufren transformaciones químicas, físicas o biológicas significativas (Del Río, Izquierdo, Salto, & Santa Cruz, 2010).

Según el Capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos (LER) (Ministerio de Medio Ambiente, 2022) , los Residuos de la Construcción y Demolición abarcan los siguientes materiales:

- Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
- Madera, vidrio y plástico
- Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla, y otros productos alquitranados
- Metales (incluidas sus aleaciones)
- Tierra (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
- Materiales de aislamiento y materiales de construcción que tienen amianto
- Materiales de construcción a partir de yeso

- Otros residuos de construcción y demolición

La composición de los RCD es bastante heterogénea, ya que varía significativamente en función de la obra o sitio del cual proceden. Diferentes autores han coincidido en relacionar las distintas actividades constructoras con las cantidades de residuos por unidad de área construida, demolida o remodelada para diferentes tipos de estructuras y técnicas constructivas, para así llegar a una composición general que permita evaluar el impacto de los RCD. En la Tabla 1 se muestra la composición de los RCD con un rango de porcentajes en el que puede variar cada componente según su procedencia, destacándose el hormigón como el componente principal.

Tabla 1. Composición general de los Residuos de Construcción y Demolición (Gálvez, Styles, Schoenberger, & Zeschmar-Lahl, 2018)

Categoría de residuo	Rango min-max [%]
Hormigón y mampostería	40-84
Hormigón	12-40
Mampostería	8-54
Asfalto	4-26
Otros (mineral)	2-9
Madera	2-4
Metal	0.2-4
Yeso	0.2-0.4
Plásticos	0.1-2
Misceláneos	2-36

2.2. Generación de Residuos de Construcción y Demolición en Europa y España

El crecimiento del sector de la construcción ha producido un incremento significativo en la generación de RCD. Sólo en Europa se produce 820 millones de toneladas al año de este tipo de residuos, es decir aproximadamente el 38% del total de residuos generados pertenecen a esta categoría según datos de Eurostat de 2020 (Figura 1).

España es el quinto país que genera más Residuos de Construcción y Demolición en Europa, evento atribuido al gran dinamismo que ha logrado el sector durante los últimos años, alcanzando incluso índices de crecimiento sobre la media del crecimiento económico español. Según las estadísticas presentadas por el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) – Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA), la generación de RCD ha alcanzado un incremento del 8.7% anual, entre los años de 2001 y 2005, logrando un promedio de producción de aproximadamente una tonelada por habitante y año, (Ministerio del Medio Ambiente, 2009).

En la Figura 2 realizada a partir de las estadísticas y datos presentadas en el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) – Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA), se muestra la distribución de la generación de RCD en el territorio español en el año 2005.

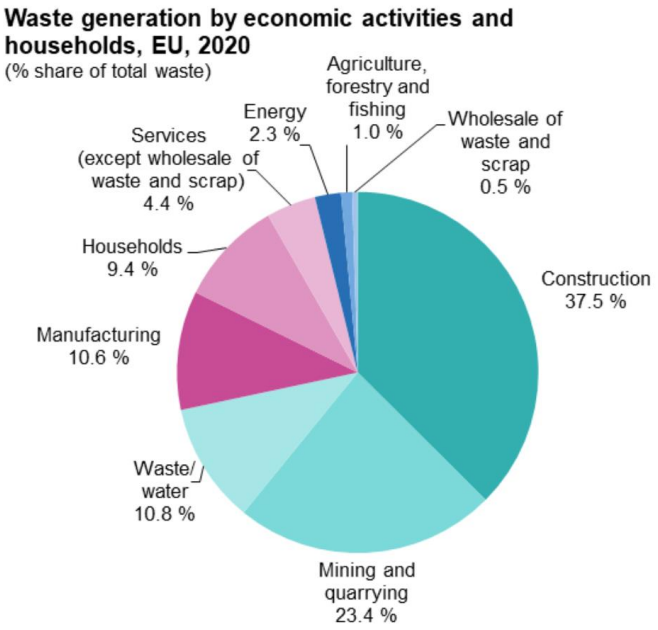


Figura 1. Generación de residuos según la actividad económica en la Unión Europea en 2020 (Eurostat, 2020)

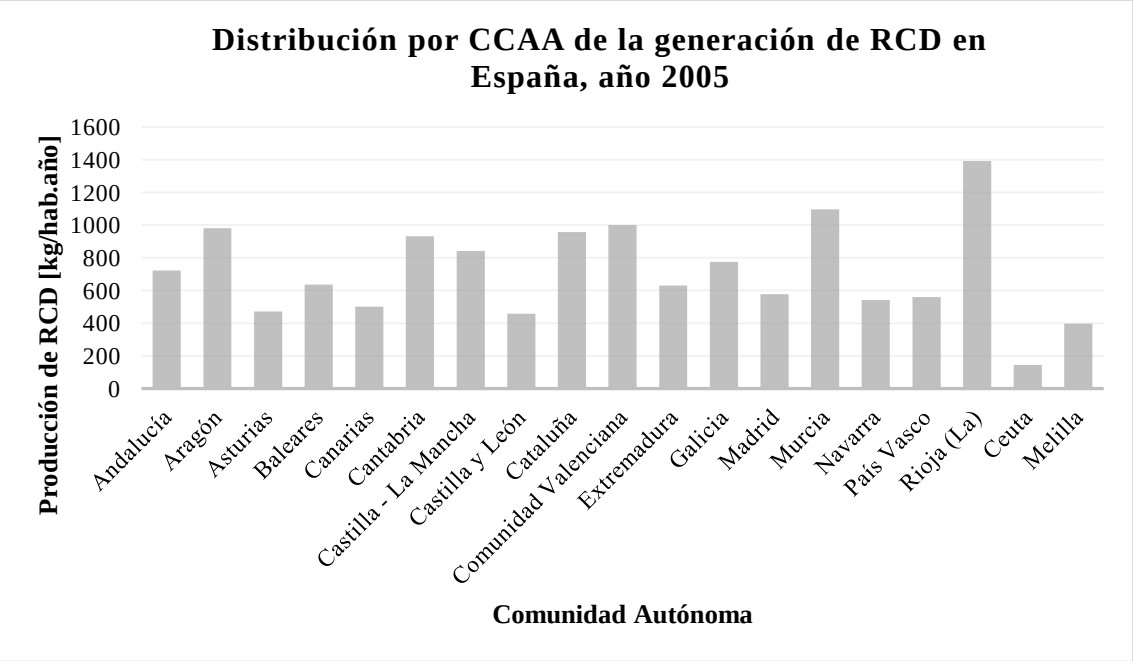


Figura 2. Distribución por CCAA de la generación de RCD en España, año 2005

Siendo, en este año, La Rioja el máximo generador de RCD con 1.39 ton/hab.año y Ceuta el menor generador de RCD con 0.15 ton/hab.año.

2.2.1. Reciclaje y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición

Los países pertenecientes a la Unión Europea son pioneros en el tema de gestión de RCD debido al contexto histórico que atravesaron. Después de la destrucción que dejó la Segunda Guerra Mundial, los países afectados se vieron obligados a manejar de alguna

manera millones de toneladas de escombros, tanto así que en 1987 solo en Berlín se procesó 100 millones de toneladas de escombros transformándolas en áridos y productos similares (Vidal, 2015).

En la actualidad, dentro de la Unión Europea cada país tiene un modelo de gestión distinto. Algunos países ya han alcanzado el objetivo del 70% de reciclado de RCD (Figura 3) y las estadísticas indican que el flujo másico total de residuos valorizados alcanza el 80% en países como Países Bajos, Alemania y Dinamarca. Sin embargo, también se ha evidenciado que en varias regiones existe ilegalidad y heterogeneidad en el mercado del material reciclado que obstaculiza su desarrollo. Por ejemplo, en España se alcanzan altas tasas de recolección de RCD bien segregado, sin embargo, la aceptación del material reciclado en el mercado es muy baja, tanto así que incluso grandes plantas de tratamiento se han convertido en vertederos temporales (Gálvez, Styles, Schoenberger, & Zeschmar-Lahl, 2018).

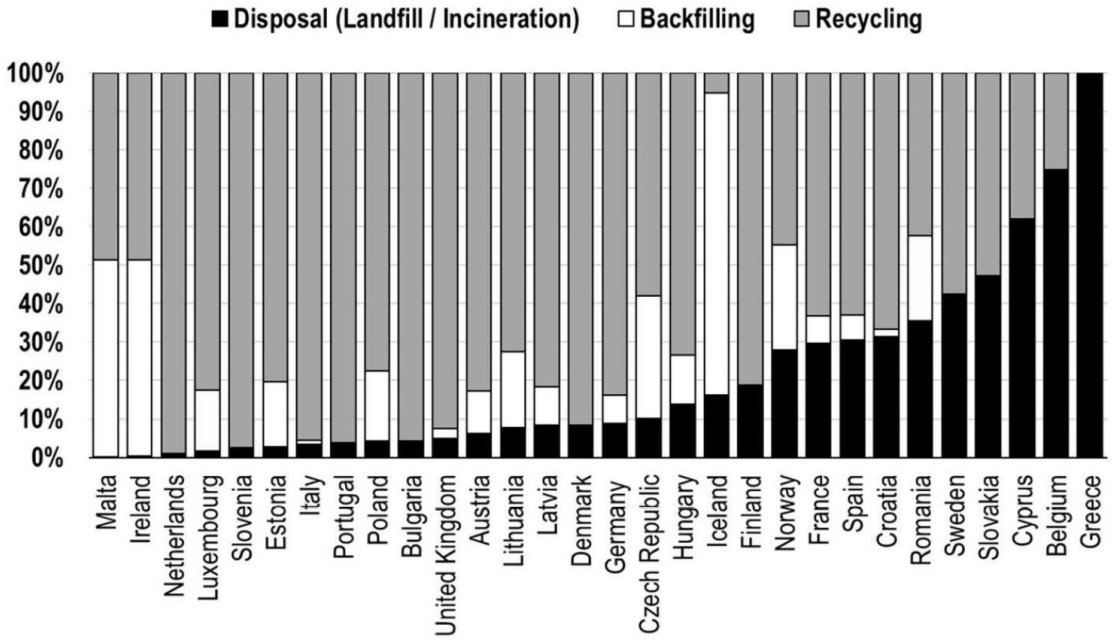


Figura 3. Tratamiento de la fracción mineral de los Residuos de Construcción y Demolición en el 2014 (Gálvez, Styles, Schoenberger, & Zeschmar-Lahl, 2018)

A excepción de algunos elementos como vigas o bloques que pueden desmontarse, los residuos de hormigón triturado "limpios" apenas son reutilizables y su reciclado produce un producto normalmente degradado (áridos), pues la recuperación de los constituyentes iniciales del cemento o del árido original no es factible.

Este material residual recuperado y usado como árido reciclado, a pesar de poder ser utilizado, presenta ciertas limitaciones. Aunque se considerara que la cantidad total de RCD se transforma en áridos reciclados, solo se lograría una sustitución del 2% de árido natural. No existen barreras técnicas para un reciclado virtual del 100% de los principales constituyentes de los RCD, residuos de hormigón y cerámicos, sino que las barreras se encuentran en su comercialización, en el mercado de materiales naturales y en la logística. Un ejemplo de estas barreras se observa en España, donde por un lado, tomando como

referencia el año 2017, se consumieron en total 100 millones de toneladas de árido, pero por otro lado, al año sólo se generan 10 millones de toneladas de RCD, a partir de los cuales el sistema de gestión permite producir únicamente hasta 3 millones de toneladas de árido reciclado aprovechable. Es decir, el impacto de este material reciclado en el total del sistema sería sólo del 3% del mercado total de áridos (Gálvez, Styles, Schoenberger, & Zeschmar-Lahl, 2018).

2.2.2. Marco regulador de la gestión de RCD

En un inicio en España, la regulación de este tipo de residuos estuvo sujeta a la Ley 42/1975 sobre desechos y residuos sólidos urbanos. De acuerdo con esta disposición, la gestión de este tipo de escombros era de competencia municipal, lo que produjo falta de responsabilidad y control sobre la gestión de residuos, dando lugar a vertidos indiscriminados en lugares no apropiados (Del Río, Izquierdo, Salto, & Santa Cruz, 2010).

Con el crecimiento de la industria de la construcción y con ello la generación de RCD, en España se redacta el I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 (I PNRCD), en el que se realiza una previsión de generación de residuos que en realidad fue superada. Ante ello, se redacta el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-2015 (PNRCD), en este plan se propone una serie de medidas basadas en el Informe de Sostenibilidad de los Recursos (ISR) de 2004. Adicional, enmarcado a este plan se redacta el Real Decreto 105/2008, por medio del cual se regula la producción y gestión de RCD, que se extiende más allá de las regulaciones europeas y considera la aplicación del principio de responsabilidad del productor y del poseedor a estos desechos (Del Río, Izquierdo, Salto, & Santa Cruz, 2010).

El Real Decreto es válido para los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) originados en proyectos de construcción, rehabilitación, reparación, reforma o demolición de bienes inmuebles y obras civiles. Sin embargo, quedan exentos ciertos tipos de desechos, como tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas, residuos de industrias extractivas, lodos de dragado no peligrosos, entre otros (Del Río, Izquierdo, Salto, & Santa Cruz, 2010). Para tratar las normas sobre la valorización de materiales procedentes de excavación y su utilización en rellenos y obras distintas a donde fueron generadas, se acude a la Orden APM/1007/2017.

2.3. Árido reciclado

Como se mencionó anteriormente, el árido reciclado es el obtenido por medio del procesamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Este procesamiento implica la revalorización y conversión de los residuos en materia prima a través de su trituración y selección. El árido reciclado representa una alternativa al uso de árido natural en construcción de carreteras, morteros cementosos y hormigones (Silva, de Brito, & Dhir, 2014).

La producción de árido reciclado presenta diferentes niveles de desarrollo a nivel europeo y en la Figura 4 se puede apreciar dicha diferencia. Según los datos tomados para este estudio realizado en 2015, Holanda es el país que posee la mayor producción de áridos

reciclados frente a su producción total de árido (representa el 22.5% de la producción total), mientras que España está muy por debajo, siendo la producción de árido reciclado solo el 1.05% de su producción total.

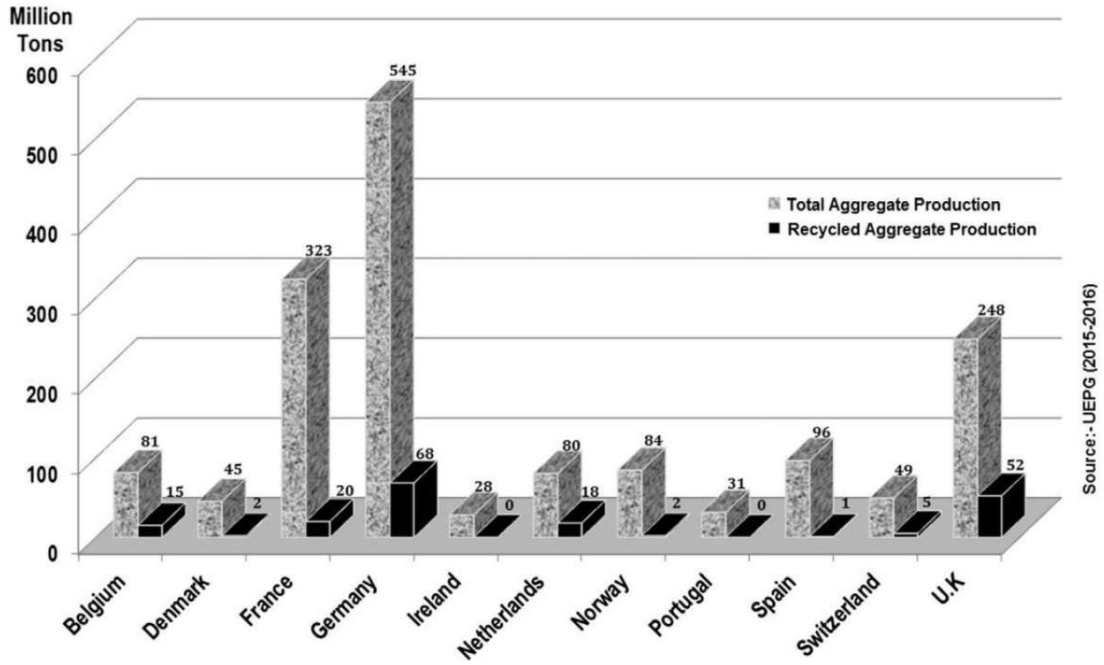


Figura 4. Comparación de la producción de áridos totales frente a la de áridos reciclados de algunos países europeos en el 2015 (Tam, Soomro, Catarina, & Evangelista, 2018)

2.3.1. Clasificación

Los áridos reciclados pueden proceder de diferentes tipos de residuos, y dependiendo de estos, se considera la siguiente clasificación:

2.3.1.1. Áridos reciclados procedentes de hormigón (ARH)

El RCD de origen del árido es el hormigón. Se lo considera dentro de esta categoría cuando el contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) es de 90% o más de su peso (Figura 5. a) (Guía española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), 2020).

2.3.1.2. Áridos reciclados cerámicos (ARC)

EL RCD de origen del árido es material cerámico, como baldosas, ladrillos y ladrillos sílico-calcáreos. Se considera al árido dentro de esta categoría cuando su contenido de material cerámico es mayor al 70% de su peso (Figura 5. b) (Guía española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), 2020).

2.3.1.3. Áridos reciclados mixtos (ARM).

El RCD de origen del árido es una mezcla de hormigón, material cerámico, y otros materiales (Figura 5. c).

Aquí se considera 2 subcategorías:

- **Áridos reciclados mixtos de hormigón (ARMh)**

Se considera al árido dentro de esta subcategoría cuando su contenido de hormigón y piedra es menor al 90% de su peso y el contenido de material cerámico es menor al 30% de su peso (Guía española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), 2020).

- **Áridos reciclados mixtos cerámicos (ARMc)**

Se considera al árido dentro de esta subcategoría cuando su contenido de material cerámico es mayor al 30% de su peso (Guía española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), 2020).

- **Árido reciclado con asfalto**

El RCD de origen del árido son capas de firmes asfálticos. Se considera al árido dentro de esta categoría cuando el contenido de materiales bituminosos se encuentra entre el 5 y 30% de su peso. Más del 30% se considera mezcla bituminosa (Guía española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), 2020).

a) b) c)

Figura 5. Tipos de áridos reciclados. a) Árido reciclado procedente de hormigón (ARH) (Redecan, s.f.) b) Árido reciclado cerámico (ARC) (GRV Ambient, s.f.) c) Árido reciclado mixto (ARM) (Redecan, s.f.)

2.3.2. Propiedades

El árido reciclado es un material bastante heterogéneo, cuyas propiedades dependen de las características del RCD de origen, del sistema de trituración y de los procedimientos seguidos para eliminar las impurezas.

El presente apartado, se centra en las propiedades del árido reciclado procedente de hormigón (ARH), que es el utilizado en la campaña experimental del presente trabajo.

El árido reciclado procedente de hormigón, tras el proceso de trituración, es una mezcla de **árido grueso** ($\geq$ 4mm) y **árido fino** ($\leq$ 4mm). El porcentaje de árido grueso que se obtiene se encuentra entre el 70 y 90% de la masa total del hormigón original (CEDEX, 2014).

El **coeficiente de forma** de este tipo de árido es bastante similar al del árido natural, y su **textura** suele ser rugosa y porosa debido al mortero de cemento que queda adherido a su superficie.

La **densidad** del árido reciclado grueso suele ser similar al del hormigón de origen y ligeramente menor (entre 5 y 10%) a la del árido grueso natural con el que se fabricó dicho hormigón. Los valores más comunes de densidad de árido reciclado grueso oscilan entre 2100 y 2600kg/m^3. En el caso del árido reciclado fino, la densidad es menor debido al mortero adherido a la superficie, teniendo comúnmente una densidad menor a 2400kg/m^3 (CEDEX, 2014). En ambos casos, por presentar una densidad mayor a 2000kg/m^3, resultan áridos perfectamente aplicables a la fabricación de hormigón, según se especifica en la norma UNE-EN 12620.

La **absorción** del árido reciclado es mayor a la del árido natural y depende de la composición del hormigón original, siendo el rango habitual entre 4 y 9%. Cabe destacar que la absorción no es igual para la fracción de finos y gruesos, pues los primeros suelen presentar un mayor porcentaje debido al mayor contenido de mortero adherido a su superficie. Como referencia, para partículas con tamaño máximo de 10mm, la absorción suele situarse entre 5 y 9%, y para partículas con tamaño máximo de 20mm, la absorción suele estar entre 4 y 8% (Laserna, 2015).

La **calidad** del árido reciclado es relativa a la proporción que se considere, y depende principalmente de la presencia de **mortero adherido** al árido natural del hormigón de origen. Para las fracciones de árido grueso la proporción de mortero adherido oscila entre 23 y 52%, mientras que para la fracción de árido fino oscila entre 32 y 61%, este porcentaje depende sobre todo del proceso de triturado por el cual se ha obtenido el árido reciclado (Laserna, 2015). Bajo este contexto, estudios han demostrado que el alto contenido de mortero adherido presente en la fracción fina de áridos reciclados, repercute negativamente en propiedades como la densidad y la absorción, concluyendo en la menor calidad del árido reciclado fino frente al árido reciclado grueso.

2.4. Hormigón con árido reciclado (ARH)

2.4.1. Generalidades y limitaciones

La aplicación de áridos reciclados para la elaboración de hormigón estructural se encuentra regularizada en cada país por diferentes normas que garantizan la calidad y aplicación del material.

En España, la normativa que regula el hormigón estructural, la EHE-08, normativa de aplicación obligatoria para estructuras de hormigón tanto de edificación como de obra civil, se enfoca en el uso del árido reciclado para la fabricación de hormigón en su Anejo 15: Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados (Laserna, 2015).

En el Anejo, se recomienda limitar al 20% el uso de árido grueso reciclado sobre el contenido total de árido grueso. Con esta limitación se procura apenas afectar las propiedades del hormigón reciclado respecto a un hormigón convencional. Para un mayor porcentaje de aplicación, el Anejo recomienda realizar estudios específicos y complementarios.

Adicional, en el Anejo se autoriza la aplicación del árido reciclado tanto para hormigón en masa como para hormigón armado de resistencia característica menor a 40 N/mm^2, excluyendo su empleo en hormigón pretensado.

Las recomendaciones de este Anejo no abarcan a los hormigones con árido fino reciclado, hormigones con árido reciclado de naturaleza distinta al hormigón, hormigones con árido reciclado procedente de estructuras con patologías y hormigones con árido reciclado procedente de hormigones especiales como aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

Otras normativas internacionales como la de Japón y la de Bélgica, presentan menos restricción en el uso de áridos reciclados, llegando a permitir hasta 50% de sustitución para la fabricación de hormigones estructurales, dependiendo de las propiedades y calidad del árido. Sin embargo, en la actualidad ya son numerosos los estudios que demuestran el comportamiento satisfactorio del hormigón reciclado con porcentajes de sustitución de hasta 100% del árido natural (Laserna, 2015).

2.4.2. Composición

El hormigón con árido reciclado se considera una matriz compuesta por cuatro elementos: mortero nuevo, árido natural, mortero de material reciclado y mortero adherido a los áridos (Figura 6).

Así, las características físicas y mecánicas generales del sistema compuesto estarán determinadas por las propiedades de estos componentes, sus modos de interacción y las proporciones de volumen que ocupan (Laserna, 2015).

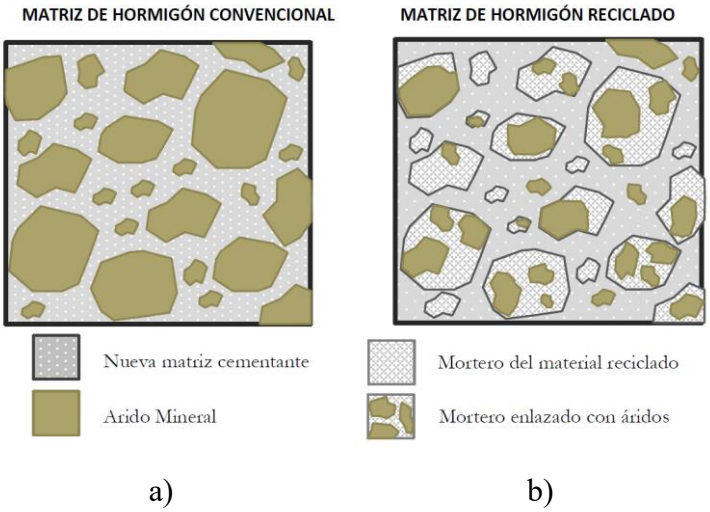


Figura 6. Comparación composición hormigón convencional vs. Hormigón con árido reciclado. a) Matriz de hormigón convencional b) Matriz de hormigón con árido reciclado (Laserna, 2015)

2.4.3. Propiedades en estado fresco

2.4.3.1. Trabajabilidad

El hormigón con árido reciclado necesita mayor cantidad de agua que su equivalente de hormigón convencional para alcanzar la misma trabajabilidad. En el caso de hormigón

con únicamente árido grueso reciclado, el volumen adicional de agua necesario se encuentra entre 5 y 10%, mientras que, si se trata de hormigón con árido fino y árido grueso reciclado, el valor adicional aumenta entre 14 y 15% (González, 2002).

El aumento de agua se produce ya que, durante el proceso de amasado, parte del mortero adherido a los áridos (Figura 6.b) se separa, dando lugar al incremento del contenido de finos en el hormigón fresco. Estos finos compuestos mayormente por material poroso producen una elevada absorción de agua, causando así la disminución no deseada de la trabajabilidad.

Para contrarrestar esta disminución de trabajabilidad, varios autores recomiendan la saturación previa del árido reciclado mediante su inmersión en agua o la adición extra de agua. Sin embargo, en el caso del árido fino reciclado, no es fácil asegurar su saturación y determinar qué cantidad de agua se combina o no con el cemento, por lo que se recomienda no utilizar árido fino reciclado para la fabricación de hormigón.

El uso de superplastificantes también se considera un buen recurso para mejorar las pérdidas de trabajabilidad del hormigón con árido reciclado.

2.4.3.2. Densidad

El contenido de aire en los hormigones de árido reciclado es superior al presente en hormigones convencionales y por consecuente sus densidades son menores. La densidad en estado fresco de hormigones con árido reciclado, habitualmente se encuentra entre 2200 y 2250kg/m^3, es decir, representa entre el 85 y 95% de la densidad de un hormigón convencional (González, 2002).

2.4.4. Propiedades mecánicas

2.4.4.1. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del hormigón con árido reciclado está significativamente influenciada por varios factores.

En primer lugar, se encuentra el nivel de sustitución de árido natural por árido reciclado. Diferentes estudios han demostrado que en general, a mayor porcentaje de sustitución de árido por árido reciclado, mayor es la disminución de la resistencia a compresión del hormigón. Se ha observado que, para fines prácticos, una sustitución de hasta el 30% de árido grueso o 20% de árido fino, no genera una disminución significativa (< 5%) en la resistencia a compresión del hormigón. Pero, si la sustitución de árido grueso es del 100% o la del árido fino es mayor al 50%, la disminución de la resistencia puede llegar a ser hasta del 30% con respecto a la resistencia del hormigón convencional equivalente (Silva, de Brito, & Dhir, 2014).

Para contrarrestar dicha disminución, se ha demostrado que el uso de agua extra o de compensación en la mezcla para la hidratación del árido reciclado, permite llegar a resistencias a compresión y asentamientos similares a la del hormigón convencional equivalente, aunque se trate de un hormigón con alto porcentaje de sustitución de árido natural por reciclado.

La relación w/c es otro factor muy influyente en la resistencia a compresión del hormigón con árido reciclado. Tavakoli (1996) ha demostrado que un hormigón elaborado con 100% de árido reciclado, pero con una relación w/c menor a la de su hormigón convencional equivalente puede alcanzar una resistencia a compresión mayor. Pero, si la relación w/c es la misma, la resistencia del hormigón con 100% de árido reciclado presenta una clara disminución (Francis, 2017).

En cuanto a la resistencia a compresión del hormigón a lo largo del tiempo, varios autores coinciden en que a edades tempranas, con un porcentaje de sustitución de 25% de árido, la resistencia del hormigón con árido reciclado es incluso mayor a la de su equivalente convencional, mientras que con una sustitución del 100% se presenta una mínima disminución, principalmente debido a las propiedades cementosas aún latentes en el mortero adherido del árido reciclado (Pavón, Etxeberría, & Martínez, 2011). Sin embargo, a edades más avanzadas, se comienza a evidenciar la disminución de la resistencia a compresión, siendo mínima en hormigones con sustitución de 25% y significativa en hormigones con sustitución del 100% (Figura 7).

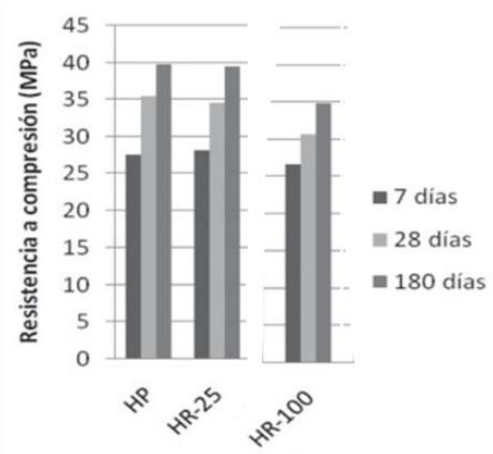


Figura 7. Resistencia a compresión de hormigones con 0%, 25% y 100% de sustitución con árido reciclado (Pavón, Etxeberría, & Martínez, 2011)

2.4.4.2. Resistencia a tracción

Al igual que ocurre con la resistencia a compresión, usualmente el hormigón con árido reciclado tiende a exhibir una menor resistencia a la tracción en comparación al hormigón equivalente con árido natural. La magnitud de la diferencia depende de varios factores, pero en general no es significativa.

Uno de los factores más influyentes es el porcentaje de sustitución de árido natural por reciclado. Varios estudios han coincidido en que, a mayor nivel de sustitución, mayor es la disminución de la resistencia a tracción del hormigón. Sin embargo, a pesar de esta clara tendencia, se han registrado casos en que el hormigón con árido reciclado ha mostrado una resistencia similar o incluso mayor a la del hormigón convencional equivalente, esto debido principalmente al mejoramiento de la fuerza de unión en la zona de transición (ITZ) entre el mortero adherido del árido reciclado y la pasta, mejora producida por la naturaleza rugosa del árido reciclado (Silva, de Brito, & Dhir, 2014).

Por otro lado, también se encuentra la influencia del método de trituración para la obtención del árido reciclado. Diferentes estudios han demostrado que el árido reciclado sometido a varios procesos de trituración da lugar a hormigones con mejor comportamiento a tracción, ya que el árido reciclado producido posee menos mortero adherido a su superficie, y por ende presenta menor absorción de agua y mayor densidad. Un árido reciclado sometido a 3 procesos de trituración puede dar lugar a un hormigón con una resistencia hasta 15% mayor que la de un hormigón fabricado con árido reciclado sometido a un solo proceso de trituración (Sánchez, 2004) .

Cabe mencionar que al igual que ocurre con la resistencia a compresión, el aumento de la absorción de agua en el árido reciclado se puede contrarrestar añadiendo agua extra en la mezcla para saturar el árido y minimizar la afectación a la resistencia a tracción del hormigón.

La variabilidad de los resultados en los diferentes estudios respecto a la resistencia a tracción es considerable y se lo puede evidenciar en la Figura 8, donde Silva, Brito y Dhir (2014) muestran una recopilación de datos obtenidos de diferentes experimentos realizados por distintos autores. En la figura se evidencia que la disminución de la resistencia a tracción es mayor cuando se trata de árido reciclado mixto (MRA) y como valores de referencia se puede observar que para una sustitución de 100% de árido reciclado grueso procedente de hormigón (RCA), que es el estudiado en el presente trabajo, la disminución de la resistencia es de aproximadamente 30% y para porcentajes de sustitución mayores al 50%, la disminución de la resistencia se encuentra por debajo del 10%.

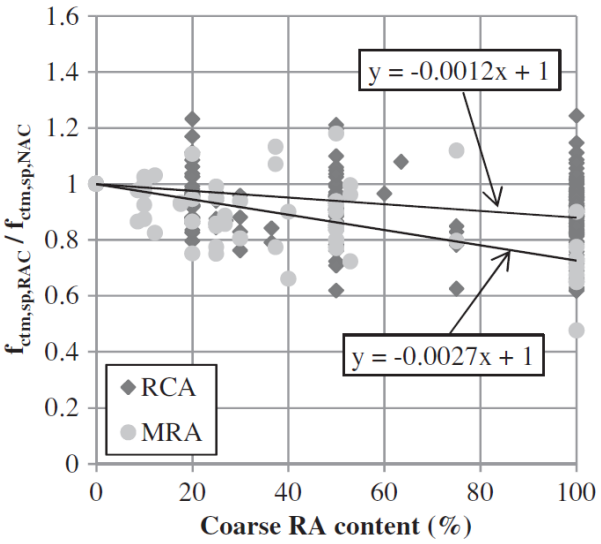


Figura 8. Influencia en la resistencia a tracción del incremento del contenido de árido grueso reciclado procedente de hormigón (RCA) y árido reciclado mixto (MRA) (Silva, de Brito, & Dhir, 2014)

2.4.4.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es una de las propiedades más afectadas por la adición de árido reciclado en el hormigón. Entre las principales razones de la disminución se encuentra el

bajo módulo de elasticidad del mortero anterior adherido al árido y las posibles fisuras que pueda presentar.

En general, varios estudios consideran que una sustitución hasta del 30% de árido reciclado tiene efectos mínimos sobre el módulo de elasticidad del hormigón. Pero, si se considera un porcentaje de sustitución de 100% de árido grueso, es posible evidenciar una disminución entre 20 – 40% respecto al hormigón con árido natural equivalente (Silva, de Brito, & Dhir, 2015).

Aunque, de acuerdo a la literatura se puede estimar un rango de variación del módulo de elasticidad por efecto de la incorporación de árido reciclado, es importante considerar que esta variación es bastante relativa y depende de distintos factores como el nivel de sustitución del árido, la edad del hormigón, las características de forma y rugosidad de los áridos, la calidad del hormigón original, entre otros. Esta dispersión de resultados se representa en la Figura 9, donde Silva, de Brito y Dhir (2015) han compilado los resultados de los diferentes experimentos realizados por distintos autores, demostrando así el efecto combinado de la gran cantidad de variables involucradas.

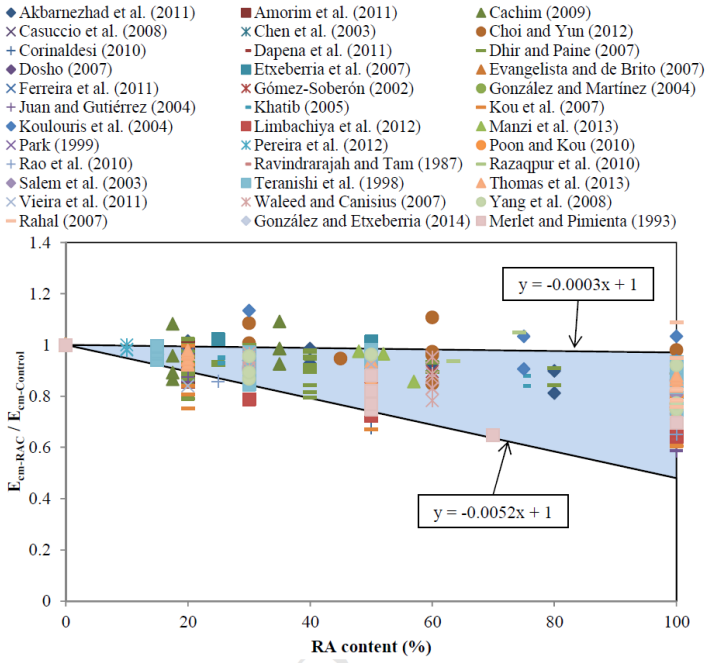


Figura 9. Efecto en el módulo de elasticidad del hormigón de la incorporación de árido reciclado en diferentes porcentajes (Silva, de Brito, & Dhir, 2015)

2.5. Fibras poliméricas

Como su nombre lo indica, las fibras poliméricas están formadas por un material polimérico, ya sea polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon o poliéster, extrusionado y posteriormente cortado.

Las fibras se rigen por la norma UNE-EN 14889-2, en donde se las distingue como clase I (micro - fibras) si su diámetro es menor a 0.30mm y clase II (macro - fibras) si su diámetro es mayor a 0.30mm (Figura 10) (Ministerio de Transportes y Movilidad

Sostenible, 2021). Las micro - fibras generalmente se emplean para fines enfocados a la durabilidad, mas no para fines estructurales, mientras que las macro - fibras sí aportan estructuralmente, y su longitud debe estar relacionada con el tamaño del árido.

Figura 10. Macro - fibras (izquierda) y micro - fibras (derecha) de polipropileno (Berríos, 2014)

2.5.1. Fibras de polipropileno

Las fibras poliméricas más utilizadas son las de polipropileno. Sus principales propiedades se muestran a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades generales de fibras de polipropileno comerciales (American Concrete Institute, 2019)

Fibras de polipropileno	
Gravedad específica [-]	0.90 - 0.91
Resistencia a tracción [MPa]	140 - 690
Módulo de elasticidad [MPa]	3450 - 4830
Elongación última [%]	15
Absorción de agua por ASTM D 570	Nula

Adicional, las fibras poliméricas de polipropileno se destacan por ser hidrófobas, es decir, que no absorben agua y por no formar uniones químicas con la matriz del hormigón, se ha demostrado que su unión se produce por interacción mecánica.

2.6. Hormigón reforzado con fibras poliméricas (polipropileno)

2.6.1. Generalidades

El ACI define al hormigón reforzado con fibras como hormigón elaborado principalmente con cementos hidráulicos, áridos y fibras de refuerzo discretas, dispersas y orientadas aleatoriamente, procedentes de materiales como acero, vidrio y polímeros orgánicos (American Concrete Institute, 2019).

La efectividad de las fibras puede ser evaluada por medio de la resistencia residual a la tracción por flexión, siguiendo la norma UNE-EN 14651. De forma alternativa, se puede utilizar la norma UNE 83515 (ensayo Barcelona con control por desplazamiento circunferencial o desplazamiento del pistón) con el fin de reducir la dispersión y el tiempo de ensayos (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2021).

En el Código Estructural Español (2021) no se especifica un contenido mínimo en fibras, sin embargo, cuando estas tienen una función estructural, se recomienda no utilizar dosificaciones inferiores al 0.25% en volumen del hormigón (equivalente a 20kg/m^3 de fibras de acero o 2.5kg/m^3 de fibras poliméricas). El límite superior del contenido en fibras se fija en el 1.5% en volumen del hormigón, el empleo de dosificaciones muy elevadas exige modificar sensiblemente la estructura granular del hormigón y para estos casos, se recomienda la consulta de bibliografía especializada (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2021).

2.6.2. Propiedades en estado fresco

2.6.2.1. Trabajabilidad

La adición de fibras al hormigón significa un incremento de mortero necesario para cubrir el área superficial de las fibras, lo que implica más pasta de cemento para la lubricación, resultando en una disminución de la trabajabilidad del hormigón a medida que aumenta el porcentaje de fibras. Adicional, la fibra mejora la fricción interna entre los materiales que componen el hormigón, afectando de igual manera la trabajabilidad.

Algunos autores se refieren a la disminución del asentamiento del hormigón como un asentamiento "aparente", ya que, si bien el hormigón puede parecer más rígido y con menor trabajabilidad, en realidad la vibración puede volverlo fluido (Texas Department of Transportation, 2019).

La disminución del asentamiento, en general, depende del tipo y las propiedades de las fibras, sin embargo, para contenidos comunes de fibras de polipropileno (0.25 - 1.5% en volumen), se ha demostrado que el asentamiento puede situarse entre 25 y 55mm (Ahmad, y otros, 2021).

Aumentar el contenido de arena, y utilizar superplastificantes o reductores de agua, puede ayudar al aumento de la trabajabilidad del hormigón reforzado con fibras.

2.6.3. Propiedades mecánicas

2.6.3.1. Resistencia a compresión

Considerando hormigones con contenido de fibras de polipropileno entre 0.1% y 2.0% en volumen, en general, varias campañas experimentales han coincidido en que la adición de fibras en diferentes cantidades, no tienen ningún efecto sobre la resistencia a compresión del hormigón. Las diferencias menores observadas son variaciones esperadas consecuencia de la experimentación como tal (American Concrete Institute, 2019).

Por otro lado, la adición de fibras de polipropileno sí que tiene un efecto significativo sobre el modo y mecanismo de falla de los cilindros de hormigón en una prueba de compresión, pues hace que la falla sea dúctil. Mientras que los cilindros de hormigón de control simple normalmente se rompen debido a la incapacidad de absorber la liberación de energía impuesta por la máquina de prueba en el momento de la falla, los cilindros de hormigón con fibras continúan soportando cargas y soportando grandes deformaciones sin romperse en pedazos (American Concrete Institute, 2019).

2.6.3.2. Módulo de elasticidad

Tras la comparación realizada por varios estudios de la variación del módulo de elasticidad para un hormigón con una misma resistencia, se ha demostrado que la adición de fibras de polipropileno entre 0.1% y 2.0% en volumen, no produce efecto alguno sobre el módulo de elasticidad (American Concrete Institute, 2019).

2.6.3.3. Resistencia residual

Considerando tracción directa, la adición de fibras rigidiza sensiblemente la respuesta en fase pre - fisura respecto a la de un hormigón convencional (Guzmán, 2015). Y, por otro lado, aporta de forma significativa la resistencia residual post - fisura del hormigón, gracias al efecto de cosido que ofrece entre las 2 caras de la fisura (Figura 11).

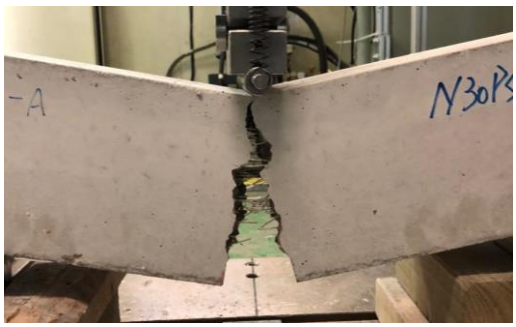


Figura 11. Efecto de cosido alcanzado por la adición de fibras en el hormigón

Las vigas reforzadas con fibras de polipropileno pueden soportar cargas más allá de la primera carga de fisura, pero a un nivel de carga reducido. La capacidad de absorber energía de deformación elástica y plástica y de conducir tensiones de tracción a través de las grietas es un factor de rendimiento importante para la capacidad de servicio (American Concrete Institute, 2019).

El contenido de fibra influye en la capacidad de carga post - fisura, en el sentido de que varios estudios han demostrado que la reducción de la carga posterior a la fisura generalmente disminuye a medida que aumenta el contenido de fibra, como se muestra en la Figura 12.

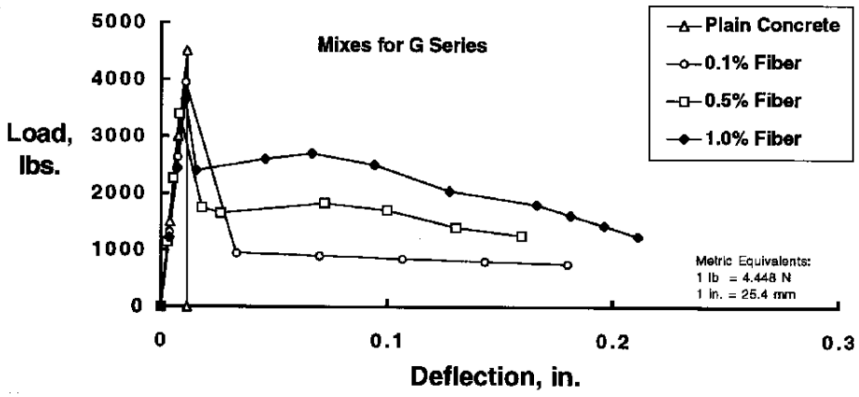


Figura 12. Comparación de las curvas Carga-Deformación para hormigón reforzado con fibras de polipropileno (American Concrete Institute, 2019)

2.6.4. Durabilidad

La adición de fibras al hormigón en general permite que el ancho de las fisuras que se forman ya sea antes o después del endurecimiento, sea mucho menor. Las fibras producen la aparición de un mayor número de fisuras más pequeñas, evitando el crecimiento de las fisuras ya existentes.

Lo que ocurre internamente es que las fibras cosen las fisuras de una forma no perpendicular, de manera que generan una fricción local que da lugar a compresiones paralelas a la fisura y tracciones perpendiculares. Como consecuencia, se tienen fisuras secundarias más curvadas y ramificadas (Figura 13), que dificultan la entrada de humedad, oxígeno o carbonatación al elemento, aportando así a su durabilidad (Pujadas, 2008).

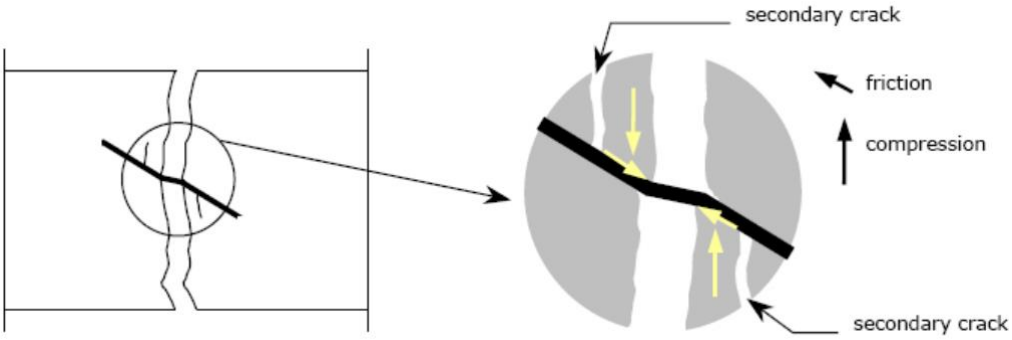


Figura 13. Aparición de fisuras secundarias en el hormigón reforzado con fibras (Pujadas, 2008)

Por otro lado, las fibras de polipropileno, al estar constituidas por un material químicamente inerte, no favorecen a la corrosión que podría presentarse en un hormigón con reforzamiento de acero.

2.6.5. Reciclaje de hormigón reforzado con fibras

El hormigón reforzado con fibras es un material cada vez más utilizado y actualmente reconocido por varios códigos estructurales como un material viable con beneficios estructurales, de durabilidad y económicos. Entre las fibras que más destacan se encuentran las fibras poliméricas, y entre ellas las de polipropileno, cuyo uso como reforzamiento en hormigón representa un mercado emergente que crece 10% anualmente (Kunieda, Ueda, & Nakamura, 2014).

A pesar de los diversos estudios realizados sobre hormigón reforzado con fibras, existe muy poco conocimiento sobre la fase de este material después de su período de servicio, razón por la cual aún no se tiene una estrategia de tratamiento como tal.

Entre las publicaciones existentes sobre el reciclaje de hormigón reforzado con fibras, destaca la publicación de Kunieda et al. (2014). En ella se analiza el reciclaje tanto de hormigón reforzado con fibras metálicas como reforzado con fibras de polipropileno. Los resultados del estudio muestran que, a mayor contenido de fibras, el tamaño del material obtenido después de la trituración del hormigón es más pequeño. Además, de que la

cantidad de energía necesaria para triturar el hormigón con fibras es mayor, debido a la tenacidad del propio hormigón.

Por otro lado, el estudio de Kunieda et al. (2014) revela que las fibras únicamente refuerzan la parte del mortero del hormigón, no la interfase entre el mortero y el árido grueso, y, considerando que la zona de transición (ITZ) es una de las partes más débiles del hormigón, se concluye en que la adición de fibras ayuda a inducir la falla en esta zona al momento de la trituración, lo que puede dar lugar a árido reciclado de mayor calidad, con menor cantidad de mortero adherido.

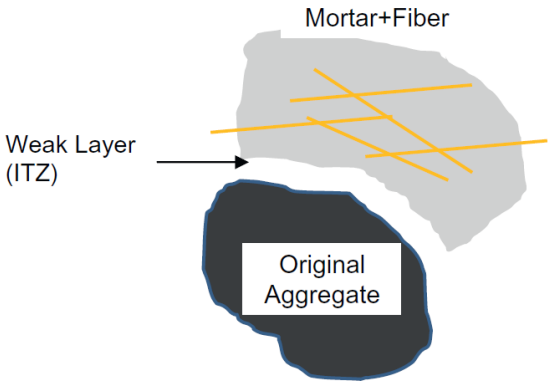


Figura 14. Mecanismo de falla en mortero por la presencia de fibras (Kunieda, Ueda, & Nakamura, 2014)

Otro estudio que destaca es el realizado por Tošić et al. (2022). En él se analizan varias generaciones de reciclado de hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Una de las conclusiones a las que se llega a través del estudio es que el reciclaje de hormigón producido con fibras conduce a una densidad ligeramente mayor y una menor absorción de agua que el reciclaje de hormigón producido sin fibras.

Adicional, la campaña experimental de Tošić et al. (2022) refleja un relativo alto nivel de recuperación de fibras, pues utilizando una trituradora de mandíbulas como proceso de reciclaje, se obtienen tasas de recuperación de fibras entre 40 y 65%.

Por otro lado, en cuanto a las propiedades del hormigón reciclado, específicamente a la resistencia residual, los resultados obtenidos demuestran una contribución significativa. La presencia de las fibras recicladas embebidas en el árido reciclado, al actuar en conjunto con las fibras nuevas incorporadas, otorga al hormigón un muy buen comportamiento, incluso en un caso logrando ser el comportamiento del hormigón reciclado (6-6-6-RAC) mejor que el comportamiento del hormigón de control (6-NAC) (Figura 15).

Y el buen comportamiento se mantiene incluso al no utilizarse fibras nuevas en el hormigón, sino únicamente las introducidas por el árido reciclado (Figura 16). Lo que sugiere que, aunque un hormigón fuera diseñado sin reforzamiento por fibras, si se utiliza el árido reciclado adecuado, se podría lograr un efecto de refuerzo de fibra “colateral” (Tošić, et al., 2022)

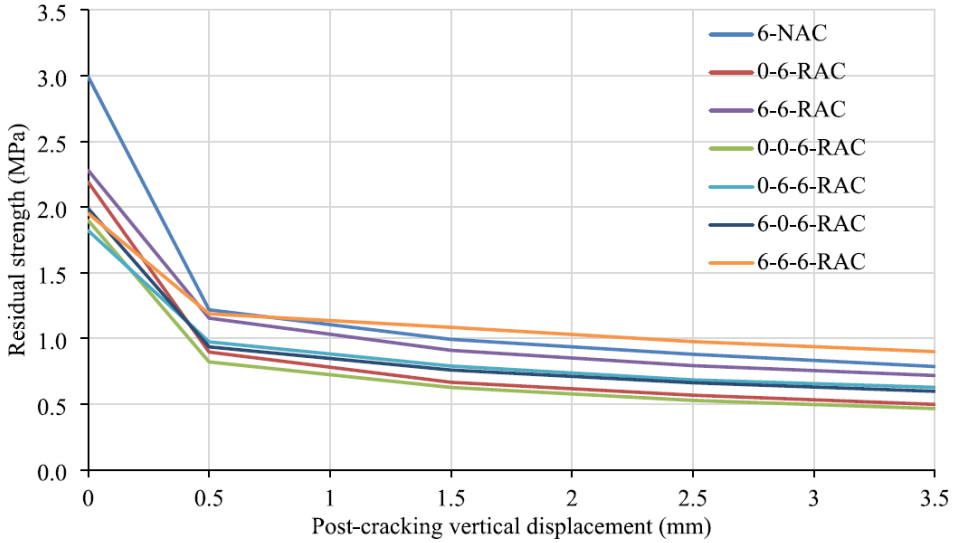


Figura 15. Resistencia residual de hormigones preparados con 6kg/m3 de fibras de polipropileno nuevas (Tošić, et al., 2022).

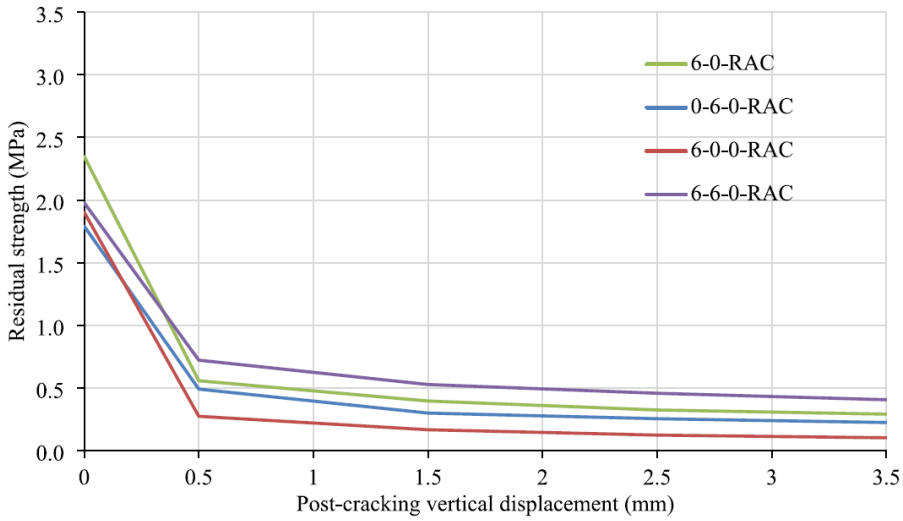


Figura 16. Resistencia residual de hormigones preparados con 0kg/m3 de fibras de polipropileno nuevas (Tošić, et al., 2022).

3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

3.1. Campaña experimental

El presente capítulo describe la campaña experimental llevada a cabo para el análisis y evaluación del uso de árido reciclado y fibras de polipropileno recicladas en el hormigón reforzado con fibras. La investigación se divide en 3 fases. La Fase I consiste en la elaboración del hormigón primario utilizando árido natural y fibras nuevas, la Fase II consiste en la elaboración de hormigón con fibras nuevas y árido reciclado con fibras embebidas, la Fase III consiste en la elaboración de hormigón con fibras recicladas y árido natural.

Para todas las fases se considera un hormigón con resistencia a compresión de 30MPa, y trabajabilidad de 12.5cm ± 2.5cm. Después de la fabricación de cada hormigón, se realiza la caracterización de las propiedades mecánicas después de los 28 días de curado, la caracterización incluye la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción residual.

La nomenclatura utilizada para identificar el hormigón con árido natural es N30 y para identificar el hormigón con árido reciclado se utiliza R30, al tratarse de hormigón reforzado con fibras cortas (40mm de longitud), en ambos casos se utiliza el término PS. Considerando esta nomenclatura, en la Tabla 3 se detalla las diferentes mezclas utilizadas para el desarrollo de la presente campaña experimental distinguiendo las diferentes fases.

Tabla 3. Definición de fases de la campaña experimental

Fase I		Fase II		Fase III	
Hormigón inicial	**Descripción**	**PPRAC**	**Descripción**	**PPRFC**	**Descripción**
N30PS-9	30MPa, Árido natural, Fibras nuevas 9kg	**R30PS-9-3**	30MPa, Árido reciclado con fibras embebidas: N30PS-9, Fibras nuevas 3kg	**N30RF-3**	30MPa, Árido natural, Fibras recicladas 3kg
		R30PS-9-9	30MPa, Árido reciclado con fibras embebidas: N30PS-9, Fibras nuevas 9kg	**N30RF-9**	30MPa, Árido natural, Fibras recicladas 9kg

PPRAC: Hormigón con árido reciclado reforzado con fibras de polipropileno; **PPRFC:** Hormigón reforzado con fibras de polipropileno recicladas.

En la Fase I el hormigón inicial es fabricado con árido natural y con un contenido de fibras cortas nuevas de 9kg. Después de la caracterización del hormigón a los 28 días, este es triturado y tanto las fibras como el árido recuperados son reutilizados para las siguientes fases, en combinación con materiales no reciclados. En la Figura 17 se presenta el esquema que detalla el proceso seguido en la presente campaña experimental.

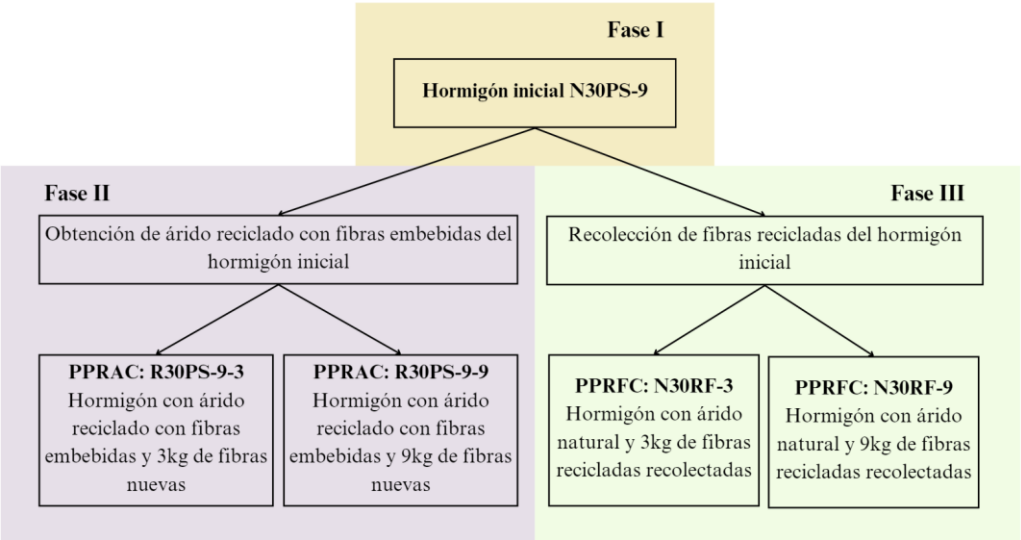


Figura 17. Esquema de desarrollo de campaña experimental

3.2. Materiales

3.2.1. Cemento

El cemento utilizado en todas las mezclas es el cemento Portland CEM II/A-L 42,5 N de Cemento Molins, disponible en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC.

3.2.2. Árido natural

El árido natural utilizado es el disponible en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC, árido obtenido de la trituración de piedra caliza extraída de

una de las canteras de Villacarca, Barcelona. Para los hormigones con árido natural se utiliza las fracciones 0/4, 4/12 y 12/20mm (Figura 18). En la Tabla 4 se presenta las propiedades del árido natural obtenidas siguiendo la norma UNE-EN 1097-6:2014.

a) b)

Figura 18. Árido natural utilizado (NA). a) 4/12mm b) 12/20mm

Tabla 4. Propiedades del árido natural (NA)

	Contenido de finos [%]	Absorción (24h) [%]	Densidad (ODD) [kg/m^3]
Árido fino (0/4)	8.1	1.56	2590
Árido grueso (4/12)	0.5	0.57	2690
Árido grueso (12/20)	2.4	0.61	2680

La curva granulométrica se determina siguiendo las normas UNE-EN 933-1:2012, el resultado se muestra en la Figura 19.

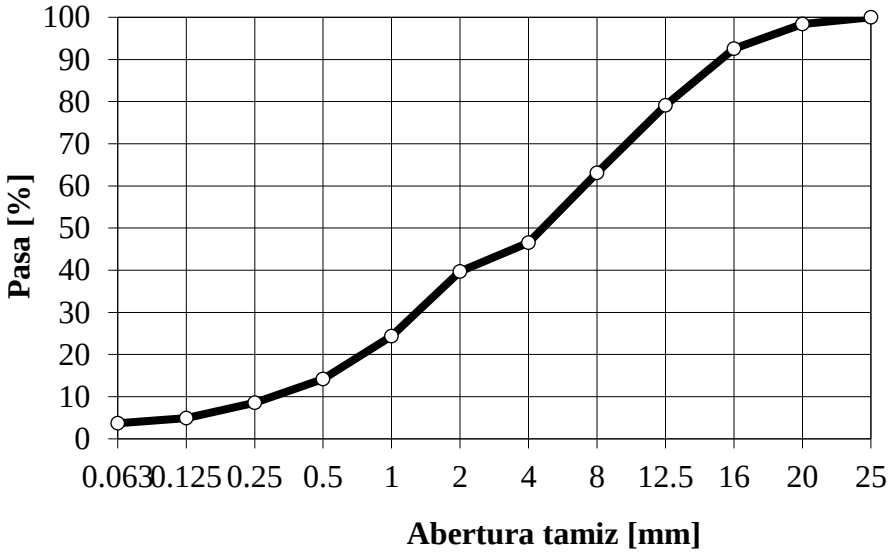


Figura 19. Granulometría árido natural (NA)

3.2.3. Árido reciclado

Para los hormigones con árido reciclado, se reemplaza el 100% de las fracciones 4/12 y 12/20mm de árido natural por reciclado. El árido reciclado es generado en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC. Para su obtención, después de 28 días de curado en una cámara húmeda del hormigón de la Fase I, éste es cortado en trozos más pequeños y triturado en una trituradora de mandíbula (Figura 20).

Figura 20. Trituradora de mandíbula

El material obtenido es tamizado para separar las fracciones 4/12 y 12/20mm utilizadas en la fabricación del hormigón con árido reciclado. En la tamización se utilizan los tamices de 4, 12 y 20mm. El material retenido en el tamiz de 4mm es conservado para la fracción 4/12mm y el retenido en el tamiz de 12mm es utilizado para la fracción 12/20mm. El material retenido en el tamiz de 20mm y el pasante del tamiz de 4mm es descartado. Del material obtenido se toman muestras de 1-2kg y se caracterizan utilizando las normas UNE-EN 933-1:2012, UNE-EN 933-2:2022 y UNE-EN 1097-6:2014.

3.2.4. Fibras

Las fibras utilizadas son de la empresa Master Builders Solutions. Son fibras de polipropileno clase II de acuerdo con la norma EN 14889-2, para uso en hormigón, mortero y lechada.

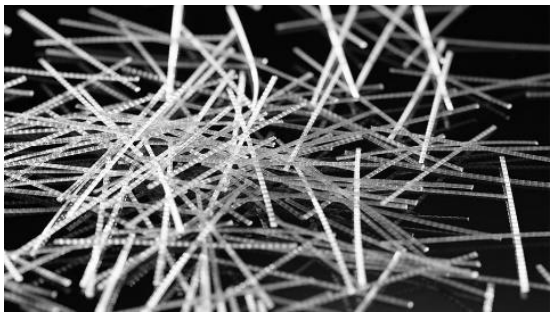


Figura 21. Fibras de polipropileno utilizadas

En la Tabla 5 se presenta las propiedades de estas fibras de acuerdo con la ficha técnica del fabricante.

Tabla 5. Propiedades de las fibras de polipropileno (Master Builders Solutions)

Fibras de polipropileno Master Builders Solutions	
Tipo de polímero	Polipropileno
Color	Transparente
Forma de la sección	Irregular
Forma longitudinal	Prensado recto
Densidad	910 kg/m^3
Longitud de la fibra	40mm
Diámetro equivalente	0.8mm
Proporción de aspecto	49
Resistencia a tracción	552MPa
Módulo secante	6000MPa
Punto de fusión	160°C
Color	Transparente

3.2.5. Aditivo

En todas las mezclas, con el fin de mejorar la trabajabilidad del hormigón sin aumentar la cantidad de agua, se utiliza el aditivo MasterPozzolith 7003, un plastificante con propiedades polifuncionales de la empresa Sika. En la Tabla 6 se presentan las propiedades de acuerdo con la ficha técnica del fabricante.

Tabla 6. Propiedades del aditivo plastificante MasterPozzolith 7003 (Master Builders Solutions, 2021)

MasterPozzolith 7003	
Función principal	Plastificante / Reductor de agua
Efecto secundario	Retrasa el fraguado por sobredosificación
pH, 20°C	4.5 ± 1
Densidad, 20°C	1.075 ± 0.02 g/cm^3
Viscosidad 20°C Brookfield Sp00/100rpm	< 15 cps.
Contenido en cloruros	< 0.1%

3.3. Caracterización del hormigón

3.3.1. Evaluación del hormigón en estado fresco

Una vez finalizado el amasado del hormigón, para todas las mezclas se evalúa su consistencia en estado fresco a través del ensayo del cono de Abrams siguiendo la norma UNE-EN 12350-2:2020. Para todos los casos se espera un asentamiento de 12.5cm ± 2.5cm.

Figura 22. Ensayo del cono de Abrams

3.3.2. Ensayos del hormigón en estado endurecido

Para cada ensayo se testean 3 probetas con la misma dosificación, todas curadas 28 días en una cámara húmeda. Los distintos ensayos se realizan en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC. Para los ensayos del módulo de elasticidad y ensayo de resistencia a compresión se utiliza la máquina Ibertest de 3 MN de capacidad de carga, la cual permite realizar ensayos controlados por carga o desplazamiento. Adicional, se utiliza una pulidora de probetas para eliminar las irregularidades en las caras y conseguir resultados más prolijos. Para el ensayo de resistencia a la tracción por flexión se utiliza la Instron 8505.

3.3.2.1. Módulo de elasticidad del hormigón

El ensayo se realiza en probetas cilíndricas siguiendo la norma UNE-EN 12390-13:2022. Antes del ensayo cada una de las probetas es sometida a tres ciclos de carga a compresión para evitar la excentricidad causada por el proceso de carga (Figura 23).

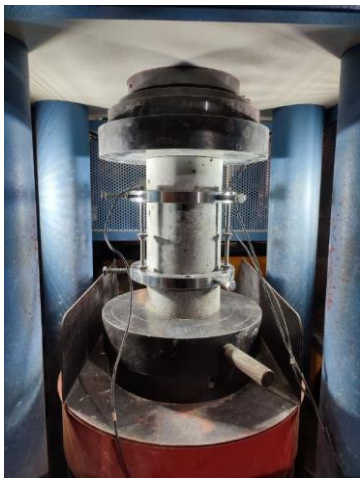


Figura 23. Ensayo cálculo módulo de elasticidad del hormigón

Al final se obtiene el módulo de elasticidad tomando la pendiente inicial de la curva tensión-deformación. De acuerdo con el Eurocódigo 2, para el cálculo del módulo se utiliza la tensión máxima de 0.4fcm (Figura 24).

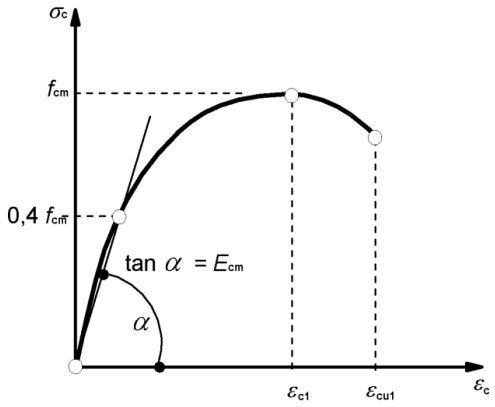


Figura 24. Diagrama para cálculo del módulo de elasticidad del hormigón *(Asociación Española de Normalización, 2013)*

3.3.2.2. Resistencia a compresión del hormigón

Aprovechando el carácter no destructivo del ensayo para la obtención del módulo de elasticidad, se utiliza las mismas probetas para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón. La norma en la que se basa el ensayo es la UNE-EN 12390-3:2020.

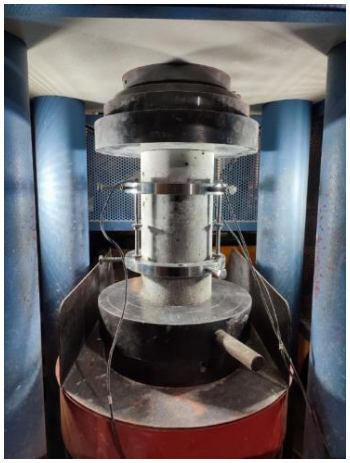


Figura 25. Ensayo de resistencia a compresión del hormigón

3.3.2.3. Resistencia residual a la tracción por flexión

El ensayo se realiza en probetas prismáticas de acuerdo con la norma UNE-EN 14651:2007. En el presente caso se utilizan prismas de 150x150mm de sección transversal y 500mm de longitud.

Figura 26. Ensayo de resistencia residual a tracción por flexión del hormigón

3.3.2.4. Contenido de fibras

Una vez triturado el hormigón inicial de la Fase I, se colecta las fibras para la Fase III. El procedimiento que se sigue es sumergir el material triturado en agua y conseguir que las fibras libres no embebidas en el árido floten hacia la superficie por la diferencia de densidades (Figura 27. a), para posteriormente ser recuperadas de forma manual. Una vez conseguidas las fibras libres (Figura 27. b), se clasifican en 3 grupos según su forma, para ser cuantificadas: largas (>25mm), cortas (<25mm) y dobladas (Figura 28).

a) b)

Figura 27. Proceso adoptado para la recuperación de fibras recicladas libres. a) Material triturado sumergido en agua b) Fibras recicladas libres recuperadas

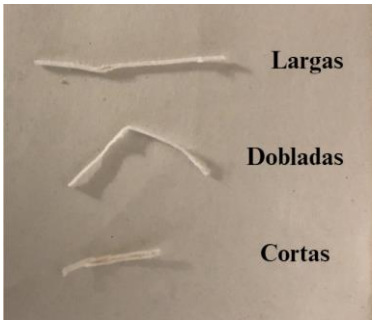


Figura 28. Clasificación de forma de fibras recicladas recuperadas

3.4. Diseño de las dosificaciones

Las dosificaciones de los hormigones investigados se muestran en la Tabla 7. En el diseño se considera una resistencia a compresión de 30MPa, una trabajabilidad clase S3 (12.5cm ± 2.5cm) y una relación $(w/c)_{ef,}$ de 0.55.

Tabla 7. Dosificaciones de los diferentes tipos de hormigón analizados

Hormigón	c[1]	Agua[1]		w/c	plast[1]	Á. natural[1]			Á. reciclado[1]		Fibras[1]	
		w	Δw			0/4	4/12	12/20	4/12	12/20	Nuevas	Recol.
N30PS-9	350	192.5	0.0	0.55	5.43	771.5	262.1	696.4			9.0	
R30PS-9-3	385		27.3		3.18	682.5			448.4	456.5	3.0	
R30PS-9-9			26.9		6.35	675.6			441.7	449.7	9.0	
N30RF-3	350		0.0		2.10	783.6	266.2	707.3				3.0
N30RF-9					5.43	771.5	262.1	696.4				9.0

[1]Los valores se muestran en kg/m^3 de hormigón.

3.5. Fabricación

Las diferentes mezclas de hormigón se realizan en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Campus Norte de la UPC. Para la fabricación se utiliza una mezcladora de capacidad máxima de 35 litros (Figura 29), por lo que para cada hormigón es necesario dividir la mezcla en dos amasadas.

La fabricación de los diferentes hormigones se lleva a cabo entre los meses de abril y junio de 2023. El desmolde se realiza a las 24 horas de la fabricación y el curado se realiza en una cámara húmeda (Figura 29).

a)

b)

Figura 29. Fabricación y curado del hormigón. a) Mezcladora 35 litros utilizada para la fabricación del hormigón b) Cámara húmeda utilizada para el curado del hormigón

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran, analizan y comparan los resultados obtenidos entre los distintos tipos de hormigón considerados. Los datos se procesan y se llega a la influencia del uso de árido y fibras recicladas en sus distintas dosificaciones y fases en el comportamiento del hormigón.

4.1. Proceso de trituración

El árido reciclado es obtenido de la trituración del hormigón de la Fase I (N30PS-9) después de 28 días de curado.

Durante el proceso se registra el peso de cada cilindro de φ150/300mm y el tiempo de trituración. Como resultados se obtiene que para cilindros de hormigón de una masa promedio de 5.48kg, el tiempo promedio de trituración es de 14.17seg, consiguiéndose una tasa de trituración de 0.39seg/kg de hormigón.

Los datos obtenidos son cualitativos y se podrían tomar como referencia para un futuro estudio sobre el consumo de energía en el proceso de trituración de hormigón reciclado.

4.2. Caracterización del árido reciclado

4.2.1. Distribución de tamaño

Una vez triturado el hormigón, el material resultante es tamizado, obteniéndose la distribución de tamaño que se muestra en la Figura 30.

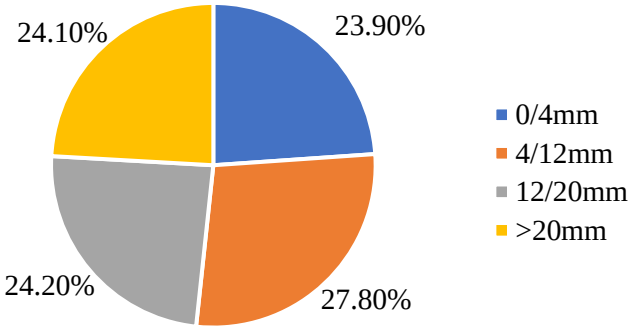


Figura 30. Distribución de tamaño del árido reciclado generado

Como se observa, la distribución es bastante regular considerando las 4 fracciones estudiadas. Las fracciones correspondientes al árido grueso (≥ 4mm), suman el 76.1% del árido reciclado generado, mientras que la fracción correspondiente a árido fino (≤ 4mm) representa el 23.9%. Resultado congruente con los valores encontrados en la bibliografía (CEDEX, 2011).

Cabe recalcar que, de todo el árido reciclado producido, para la elaboración del nuevo hormigón en el presente estudio, únicamente se utiliza las fracciones de árido grueso menores a 20mm, las cuales representan el 52% del total de árido reciclado generado.

4.2.2. Clasificación

Entre el material generado producto de la trituración y después de la tamización, se consigue árido grueso reciclado sin fibras embebidas (RA) (Figura 31), árido grueso reciclado con fibras embebidas (RAF) (Figura 32) y fibras libres.

a) b)

Figura 31. Árido reciclado sin fibras embebidas (RA). a) 4/12mm b) 12/20mm

a) b)

Figura 32. Árido reciclado con fibras embebidas (RAF). a) 4/12mm b) 12/20mm

El material utilizado en el presente estudio es el árido reciclado con fibras embebidas (RAF) y las fibras libres recolectadas por el proceso descrito en la sección 3.3.2.4. El árido reciclado con fibras embebidas es el árido cuya superficie se encuentra parcial o totalmente cubierta por mortero con fibras adheridas a él y las fibras libres son las que se han desprendido en el proceso de trituración (Figura 33).

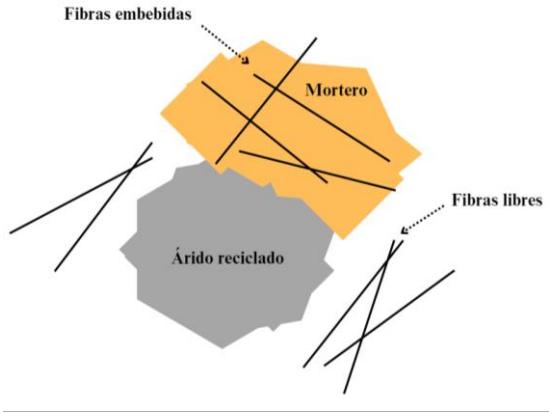


Figura 33. Representación de árido reciclado con fibras embebidas (RAF) y fibras libres

4.2.3. Granulometría

En la Tabla 8 y Figura 34 se presenta la comparación entre la granulometría del RAF y el NA. En el gráfico se observa que, a pesar de no existir diferencia significativa, la curva correspondiente al RAF se encuentra ligeramente por debajo de la curva granulométrica del NA, es decir las partículas de árido reciclado generado son ligeramente de mayor tamaño que las del árido natural, hecho atribuido a la presencia del mortero adherido en la superficie del árido como resultado del reciclaje del hormigón.

Tabla 8. Porcentaje de masa pasante en los diferentes tamaños de tamiz para el árido natural (NA) y para el árido reciclado con fibras embebidas (RAF)

Fracción	Porcentaje de masa pasante	
mm	**Árido natural (NA)**	**Árido reciclado (RAF)**
0.063	4%	3%
0.125	5%	4%
0.250	9%	8%
0.500	14%	13%
1	24%	22%
2	40%	35%
4	47%	41%
8	63%	54%
12.5	79%	76%
16	93%	87%
20	98%	100%
25	100%	100%
Finos	5%	4%

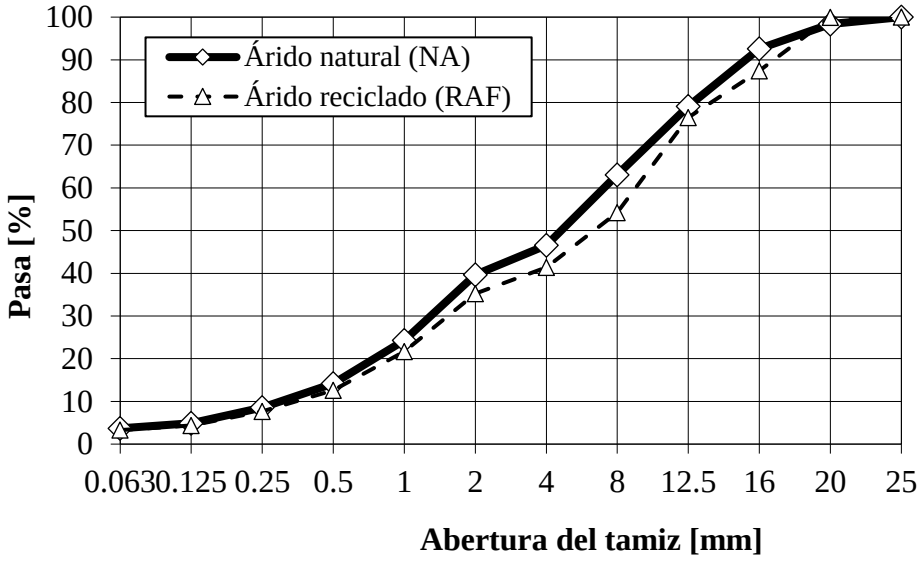


Figura 34. Curva granulométrica del árido natural (NA) y del árido reciclado con fibras embebidas (RAF)

4.2.4. Contenido de finos, absorción y densidad

Del RAF se extrae muestras de 1-2kg y, siguiendo las normas descritas en la sección 3.2.3, se obtiene las propiedades del árido generado, las cuales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades de árido reciclado

Árido	Fracción	Contenido de finos [%]	Absorción (24h) [%]	Densidad (ODD) [kg/m^3]
RAF	4/12mm	3.45	6.82	2269
	12/20mm	6.76	5.28	2310

En primer lugar, en la Tabla 9 se observa que el contenido de finos en el RAF generado es mayor respecto al presente en el NA (Tabla 4), manteniéndose siempre por debajo de 7%. Por otro lado, en cuanto a la absorción del árido a las 24 horas, se observa que el RAF presenta una absorción entre 5 y 7%, valores significativamente mayores que los obtenidos para el NA, pero habituales para áridos reciclados (rango entre 4 y 9%) según el Catálogo de Residuos de Construcción y Demolición de CEDEX (CEDEX, 2014). Por último, se evidencia que la densidad del RAF es menor a la del NA, presentando una disminución entre el 14 y 16%, valores mayores al rango habitual (5 - 10%) según CEDEX (CEDEX, 2014).

4.3. Contenido de fibras

Después de la recolección y clasificación manual de las fibras libres provenientes del material triturado del hormigón de la Fase I (N30PS-9), se obtiene los resultados que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de cuantificación de fibras libres recuperadas

Tasa de recuperación de fibras [%]	Distribución de forma de fibras recuperadas [%]		
	Cortas (<25mm)	Dobladas	Largas (>25mm)
23.3	38.9	18.5	42.6

Como se observa en la Tabla 10, se logra la recuperación del 23.3% de fibras libres, siendo el porcentaje faltante correspondiente en gran parte a fibras embebidas o incrustadas en el árido y en menor proporción a pérdidas causadas por el proceso manual de recolección adoptado. La tasa de recuperación es relativamente baja a comparación de otros estudios en los que se utilizó la misma técnica, pero las fibras fueron de mayor tamaño (Tošić et al., 2022). De esta manera se demuestra la influencia del tamaño de la fibra en la tasa de recuperación, siendo este valor más bajo mientras menor es el tamaño de la fibra.

En cuanto a la forma de las fibras recuperadas, se observa que hay mayor concentración de fibras cortas y largas, siendo el contenido de fibras largas el más representativo.

4.4. Caracterización del hormigón

4.4.1. Consistencia en estado fresco

Para cada amasada se determina la consistencia del hormigón en estado fresco. El rango esperado es de 12.5cm ± 2.5cm. A continuación, en la Tabla 11, se muestra el asentamiento promedio de las diferentes amasadas obtenidos por el ensayo de cono de Abrams para cada tipo de hormigón en las diferentes fases analizadas.

Tabla 11. Resultados de asentamiento del hormigón por ensayo de cono de Abrams

Fase	Hormigón	Aditivo [kg/m3]	Aditivo [%][1]	Asentamiento promedio [cm]
I	N30PS-9	5.43	1.55	13.5
II	R30PS-9-3	3.18	0.83	14.0
	R30PS-9-9	6.35	1.65	11.0
III	N30RF-3	2.10	0.60	11.5
	N30RF-9	5.43	1.55	14.0

[1]El porcentaje de aditivo se refiere a la masa de aditivo respecto a la masa del cementante utilizado en la dosificación.

Con el fin de procurar mantener un asentamiento dentro del rango establecido, se realizan ensayos previos para determinar la cantidad de aditivo necesario. Como se observa en la Tabla 11, el asentamiento obtenido para todos los tipos de hormigón cumple con el objetivo.

En cuanto al aditivo utilizado se observa que, para casi todos los tipos de hormigón, la dosificación se encuentra dentro o muy cercana a los rangos habituales mencionados por el fabricante (0.6 – 1.5%) (Master Builders Solutions, 2021). Entre las dosificaciones destacan las del hormigón R30PS-9-3 y R30PS-9-9, donde se observa mayor cantidad de aditivo utilizado respecto a los otros hormigones, demostrándose la influencia de las fibras adheridas anteriormente al árido reciclado en la trabajabilidad del hormigón.

4.4.2. Caracterización en estado endurecido

4.4.2.1. Resistencia a compresión

En la Tabla 12 se muestra la resistencia a compresión para cada tipo de hormigón a 28 días de curado. La tabla muestra el promedio de resistencia de las 3 probetas ensayadas y el coeficiente de variación (CoV).

Tabla 12. Resultados de resistencia a compresión del hormigón a 28 días de curado

Fase	Hormigón	f_{cm} [MPa]	CoV [%]
I	N30PS-9	35.99	3.9
II	R30PS-9-3	32.81	4.6
	R30PS-9-9	32.94	5.7
III	N30RF-3	35.22	1.6
	N30RF-9	34.88	3.0

En la Figura 35 se muestra gráficamente los resultados de la resistencia a compresión de los hormigones ensayados, siendo la barra de error la representación del coeficiente de variación. En primer lugar, se observa que en general los hormigones reciclados presentan una resistencia a compresión ligeramente menor que la del hormigón inicial N30PS-9 (disminución entre el 2 y 9%). Por otro lado, dentro de los hormigones elaborados con el mismo árido, se observa que la influencia del contenido de fibras es prácticamente imperceptible.

Considerando el contenido de fibras constante entre los hormigones reciclados, se tiene que en promedio los hormigones R30PS-9 (con árido RAF y fibras nuevas) son los que presentan la menor resistencia a compresión, 32.81MPa para 3kg/m^3 de fibras y 32.94MPa para 9kg/m^3 de fibras, resultado atribuido probablemente a la provocación de enredos y generación de vacíos a causa de las fibras previamente adheridas en el árido reciclado y a la menor densidad en sí del árido.

Al final se obtiene que la resistencia a compresión objetivo de 30MPa es alcanzada para todos los hormigones reciclados estudiados.

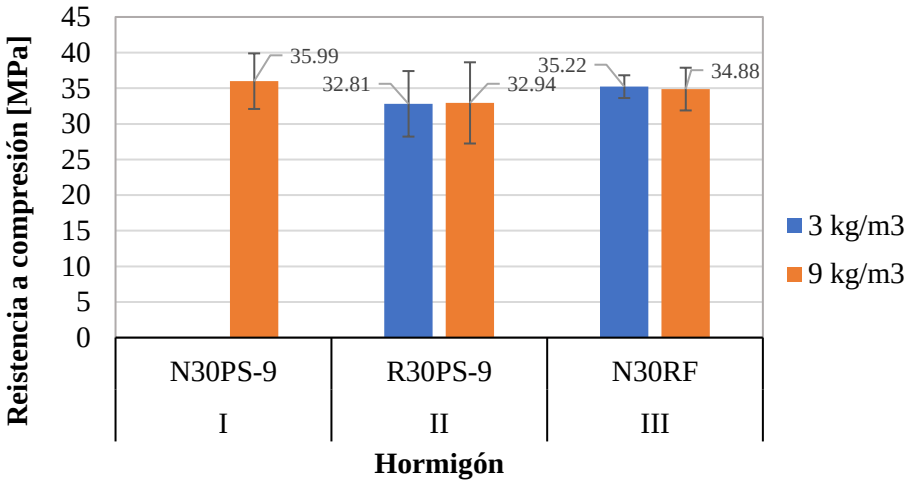


Figura 35. Resultados de resistencia a compresión del hormigón a 28 días

4.4.2.2. Módulo de elasticidad

En la Tabla 13 se muestra el módulo de elasticidad para cada tipo de hormigón. La tabla muestra el promedio de las 3 probetas ensayadas y el coeficiente de variación (CoV).

Tabla 13. Resultados de módulo de elasticidad del hormigón

Fase	Hormigón	E_{cm} [MPa]	CoV [%]
I	N30PS-9	30 922	1.0
II	R30PS-9-3	25 987	0.9
	R30PS-9-9	25 393	1.0
III	N30RF-3	33 641	5.9
	N30RF-9	32 588	1.8

En la Figura 36 se presenta gráficamente los resultados del módulo de elasticidad de los hormigones ensayados, siendo la barra de error la representación del coeficiente de variación. Dentro de los hormigones con el mismo árido se observa que la influencia del contenido de fibras es relativamente baja (las diferencias se encuentran entre 2 y 3%). Por otro lado, considerando los diferentes tipos de áridos utilizados, se evidencia que el módulo de elasticidad del hormigón N30RF (con árido NA y fibras recicladas

recolectadas) es mayor al hormigón primario N30PS-9, el incremento es de 9% para 3kg/m^3 de fibras y de 5% para 9kg/m^3 de fibras. Mientras que, para el hormigón con árido RAF, se observa una disminución de entre el 15 y 22%, disminución acorde a la literatura existente sobre la influencia del árido reciclado en el módulo de elasticidad del hormigón (Silva, de Brito, & Dhir, 2015).

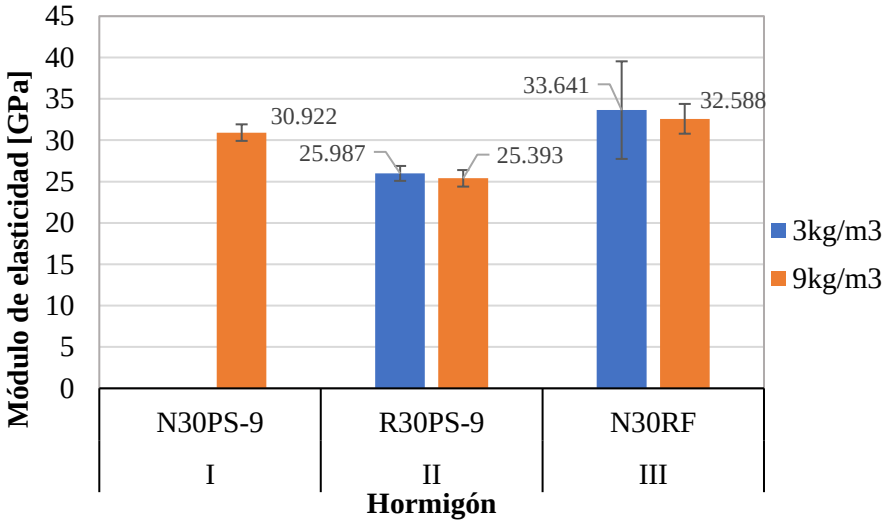


Figura 36. Resultados de módulo de elasticidad del hormigón

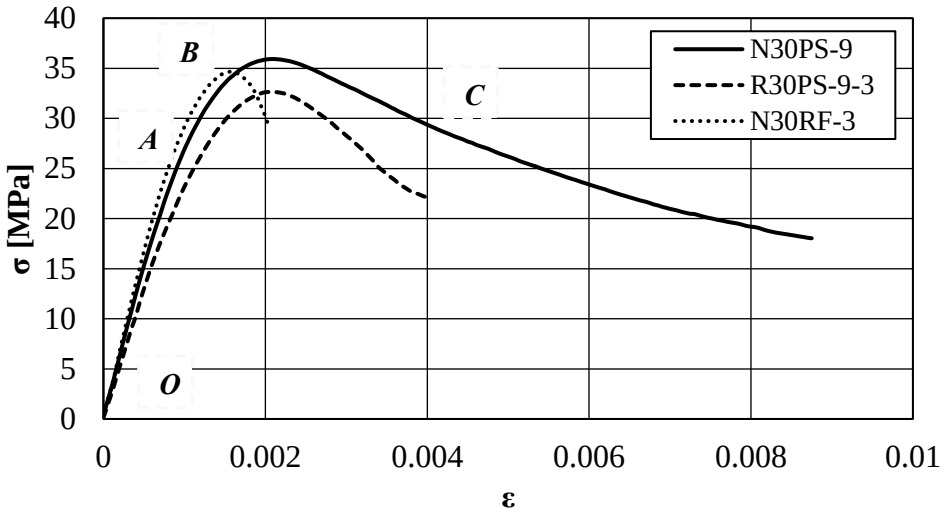
4.4.2.3. Curva tensión-deformación (σ – ε)

La Figura 37 muestra los efectos del árido reciclado y las fibras en el comportamiento tensión-deformación del hormigón. Para las distintas probetas, los ensayos fueron detenidos sin seguir el mismo criterio, razón por la cual no se tiene el mismo desarrollo de la curva en los diferentes casos. Cada curva representa el promedio de los 3 especímenes ensayados de cada tipo de hormigón.

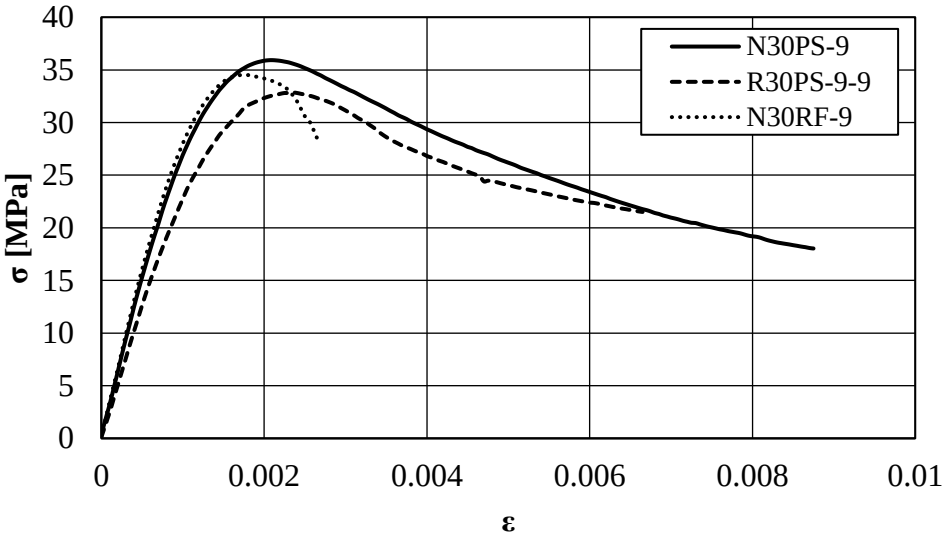
Como se observa en la figura, en general para todos los hormigones se obtiene una forma similar de la curva tensión-deformación, en donde se distingue particularmente 4 zonas: zona elástica (O-A), zona elasto-plástica (A-B), zona de fluencia (B-C) y zona de fractura (Figura 37. a).

Por otro lado, se evidencia la influencia del árido RAF en la disminución de la tensión máxima (hormigón R30PS-9). En cuanto a la capacidad de disipación de energía (área bajo la curva), se observa que, considerando la misma dosificación de fibras, el hormigón con RAF (R30PS-9) presenta un mejor comportamiento respecto al hormigón N30RF-9 debido al aporte adicional de las fibras ya presentes en el árido reciclado utilizado.

Por último, acerca de las fibras recicladas (no embebidas) utilizadas (N30RF-9), se observa que su incorporación representa una disminución significativa de la capacidad de disipación de energía respecto al hormigón primario con fibras nuevas (N30PS-9), posiblemente debido al desgaste presente en las fibras.



a)



b)

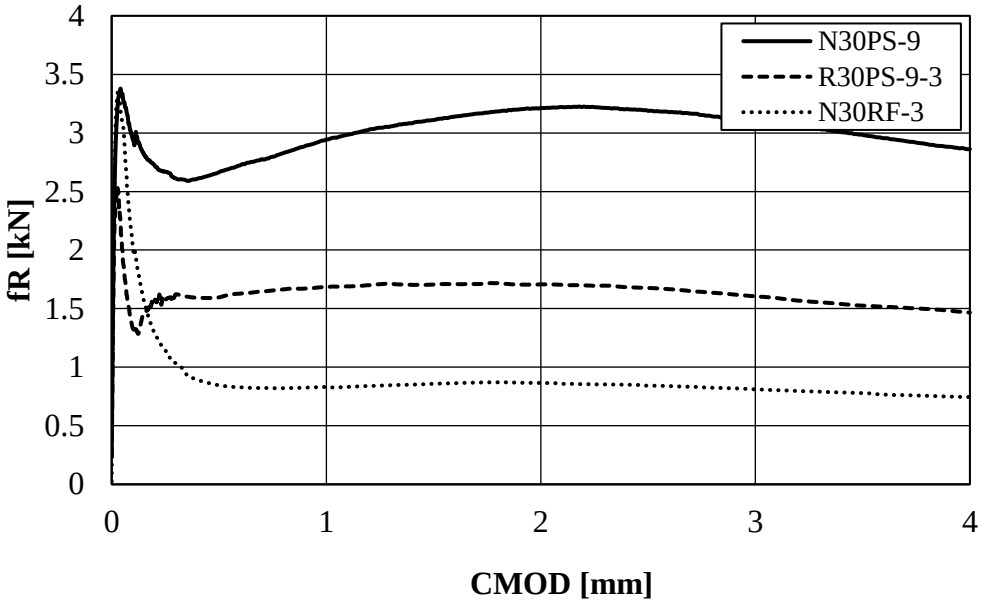
Figura 37. Curva tensión - deformación (σ – ε). a) 3kg/m^3 b) 9kg/m^3

4.4.2.4. Resistencia residual

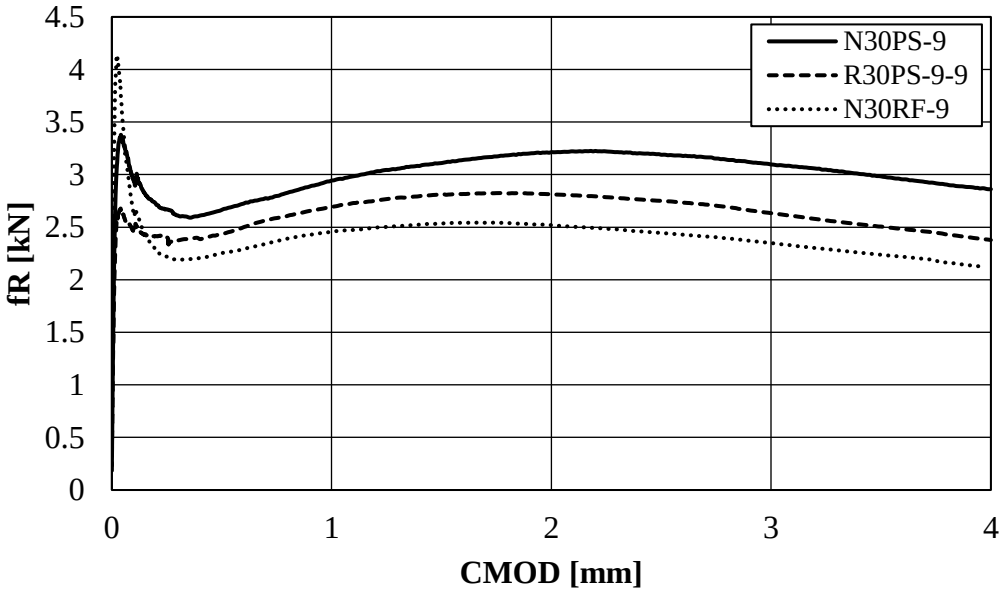
En la Figura 38 se muestra los diagramas obtenidos del ensayo de resistencia residual a la tracción por flexión. Cada curva representa el promedio de los 3 especímenes ensayados de cada tipo de hormigón.

En primer lugar, por la forma de la curva, es posible identificar 2 grupos, el primero relacionado con los hormigones con contenido de fibras de 3kg/m^3 (R30PS-9-3 y N30RF-3) (Figura 38. a) y el segundo relacionado con los hormigones con contenido de fibras de 9kg/m^3 (N30PS-9, R30PS-9-9 y N30RF-9) (Figura 38. b). Considerando estas agrupaciones, es claro distinguir la influencia del contenido de fibras en el comportamiento post - fisuración del hormigón, influencia importante que se da independientemente del tipo de fibras o áridos utilizados, y resultado coherente con la literatura (American Concrete Institute, 2019). También en esta etapa, considerando

ambos tipos de hormigones reciclados, se hace evidente el aporte positivo de las fibras embebidas en el árido en el hormigón R30PS-9.



a)



b)

Figura 38. Curva tracción - deformación ($f_{R,j}$-CMOD) por ensayo de tracción por flexión a) 3kg/m^3 b) 9kg/m^3

Los resultados de la resistencia residual a tracción se presentan numéricamente en la Tabla 14. La tabla muestra el promedio de los resultados obtenidos de los 3 especímenes ensayados para cada tipo de hormigón con el coeficiente de variación (CoV) en paréntesis.

Para la presentación de los resultados se considera f_{LOP}, f_{R1}, f_{R2}, f_{R3} y f_{R4}. f_{LOP} es la resistencia a la tracción por flexión en que la carga alcanza la carga de fisuración, y f_{R1}, f_{R2}, f_{R3} y f_{R4} son las resistencias a la tracción por flexión correspondientes a los CMOD 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5mm.

Tabla 14. Resultados promedio de resistencia residual a tracción del hormigón

Fase	Hormigón	f_{LOP} [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
I	N30PS-9	3.38 (5.25%)	2.66 (8.77%)	3.11 (9.77%)	3.19 (8.94%)	2.98 (10.21%)
II	R30PS-9-3	3.30 (19.74%)	1.60 (47.53%)	1.71 (32.81%)	1.68 (31.87%)	1.53 (34.42%)
	R30PS-9-9	3.06 (20.61%)	2.43 (24.91%)	2.81 (22.50%)	2.75 (21.74%)	2.51 (21.53%)
III	N30RF-3	3.40 (8.04%)	0.85 (34.80%)	0.86 (50.06%)	0.84 (57.70%)	0.78 (60.91%)
	N30RF-9	4.14 (0.70%)	2.25 (10.18%)	2.54 (15.02%)	2.44 (16.09%)	2.24 (15.40%)

En los resultados se observa que el hormigón con árido natural y fibras recicladas (N30RF) es el que alcanza el mayor pico (f_{LOP}), evidenciándose la influencia de la calidad del árido en la carga de fisuración. Sin embargo, al mismo tiempo se observa que el hormigón N30RF es el que posee el desempeño post - fisuración más bajo entre los demás hormigones con el mismo contenido de fibras. Comparando el hormigón N30RF-9 con su equivalente con fibras nuevas N30PS-9, se observa una disminución en promedio del 18% en la fase post - fisuración, demostrándose nuevamente la influencia del desgaste y la menor longitud en este tipo de fibras recicladas. Por otro lado, se evidencia el aporte de las fibras embebidas del árido reciclado en el hormigón R30PS-9 al presentar un mejor comportamiento post - fisuración respecto al otro hormigón reciclado (N30PS-9).

Cabe mencionar que como se observa en la Tabla 14, los coeficientes de variación de los resultados son mayores en la fase post - fisuración (f_{R1}, f_{R2}, f_{R3} y f_{R4}).

Una vez realizado el ensayo para la determinación de la resistencia residual a la tracción por flexión, se realiza el conteo de las fibras en ambas caras (A y B) de la viga ensayada (Figura 39).

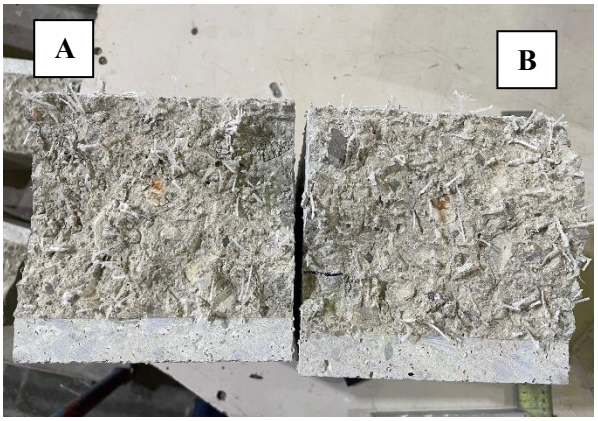
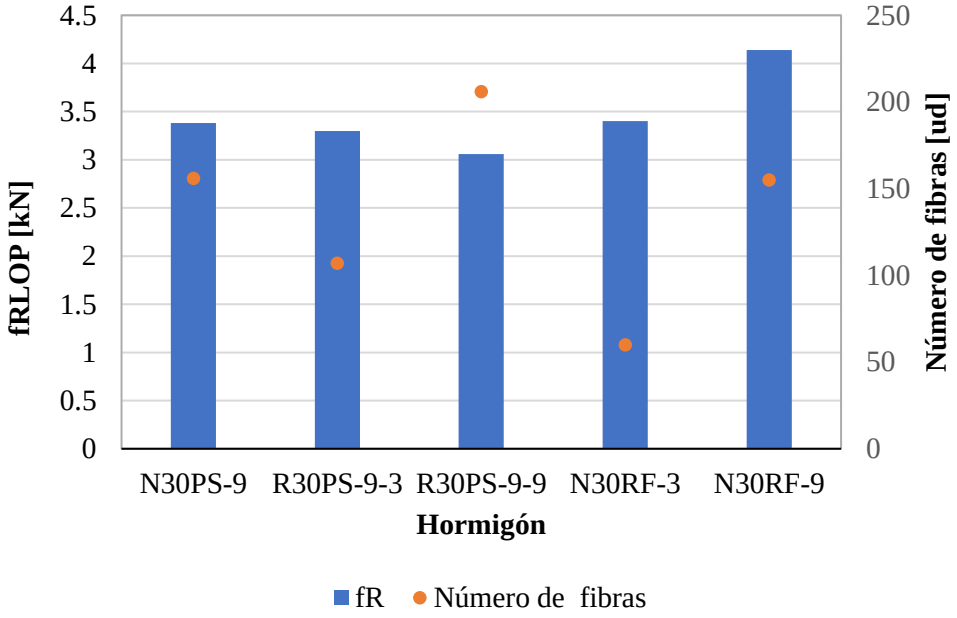
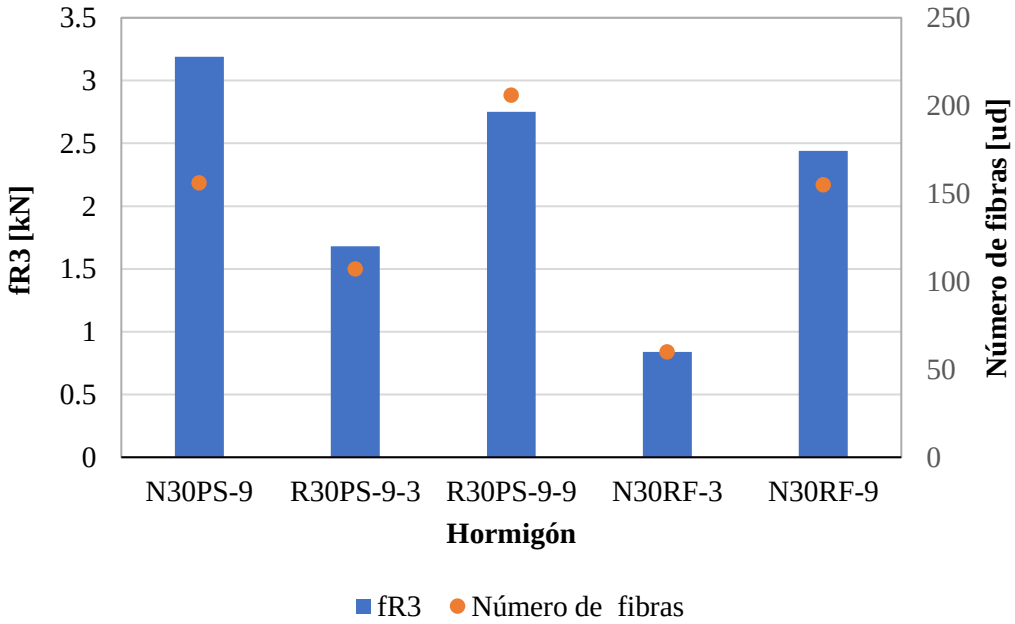


Figura 39. Sistema de conteo de fibras después de ensayo de resistencia residual a la tracción por flexión

En la Figura 40 se muestra el promedio de fibras contadas para las 3 vigas ensayadas por cada tipo de hormigón y su relación con la resistencia residual obtenidas.



a)



b)

Figura 40. Relación entre número de fibras y resistencia residual a la tracción por flexión a) f_{LOP} b) f_{R3}

Como se observa en la Figura 40. a, no existe una relación definida entre el número de fibras y la resistencia pico f_{LOP}, sin embargo, la tendencia se marca en la fase post - fisuración (Figura 40. b), donde se observa una relación directa entre la resistencia f_R y el

número de fibras. También se destaca que en los hormigones N30PS-9 y N30RF-9 el número de fibras es prácticamente el mismo, pero el primero, al tratarse de fibras nuevas, posee una mayor resistencia que el segundo fabricado con fibras recicladas, demostrándose la influencia no solo del número de fibras, sino también de la calidad de las fibras en la resistencia residual del hormigón.

Con los promedios y coeficientes de variación para las resistencias residuales obtenidas, se calcula las resistencias características para cada tipo de hormigón. Los valores se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Resistencia residual característica del hormigón

Fase	Hormigón	f_{Lk} [MPa]	f_{R1k} [MPa]	f_{R2k} [MPa]	f_{R3k} [MPa]	f_{R4k} [MPa]
I	N30PS-9	3.09	2.28	2.61	2.72	2.48
II	R30PS-9-3	2.23	0.35	0.79	0.80	0.66
	R30PS-9-9	2.03	1.44	1.77	1.77	1.62
III	N30RF-3	2.95	0.36	0.15	0.05	0.00
	N30RF-9	4.10	1.88	1.91	1.80	1.67

Con los valores obtenidos se consigue clasificar a cada tipo de hormigón por su resistencia post - fisuración y se determina si las fibras pueden ser consideradas como sustitución del refuerzo convencional para el estado límite último siguiendo los parámetros establecidos por el Model Code for Concrete Structures 2010 (Special Acticity Group & New Model Code, 2013). Los resultados se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 16. Clasificación de la resistencia post - fisuración del hormigón

Fase	Hormigón	Clasificación	Sustitución refuerzo
I	N30PS-9	2.0 d	Cumple
II	R30PS-9-3	n/a	No cumple
	R30PS-9-9	1.0 d	Cumple
III	N30RF-3	n/a	No cumple
	N30RF-9	1.0 c	Cumple

Como se observa en la Tabla 16, según el Model Code for Concrete Structures 2010 (2013), los hormigones con contenido de fibras de 9kg/m^3, sean estas recicladas o nuevas (N30PS-9, R30PS-9-9 y N30RF-9), cumplen con que el reforzamiento con fibras utilizado puede sustituir el refuerzo convencional para el estado límite último, mientras que los hormigones con contenido de fibras de 3kg/m^3 (R30PS-9-3 y N30RF-3) no cumplen con estos parámetros y de acuerdo a los valores obtenidos, tampoco pueden ser clasificados según el Model Code 2010.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1. Introducción

En el presente trabajo se evalúa y cuantifica el efecto del uso de árido reciclado y fibras recicladas de polipropileno en las propiedades de un nuevo hormigón reforzado con fibras elaborado a partir de los materiales reciclados antes mencionados.

Para ello se realiza una campaña experimental que consta de 3 Fases. Fase I: parte de la elaboración de un hormigón inicial (N30PS-9) fabricado con árido natural (NA) y 9kg/m^3 de fibras nuevas. Después de 28 días de curado, este hormigón es triturado y del material resultante se elabora los hormigones de las siguientes fases. Fase II: se elabora un hormigón con árido reciclado con fibras embebidas (RAF) y fibras nuevas en contenido de 3 y 9kg/m^3 (R30PS-9-3 y R30PS-9-9, respectivamente). Fase III: se elabora un hormigón con árido natural (NA) y fibras recicladas recuperadas en contenido de 3 y 9kg/m^3 (N30RF-3 y N30RF-9, respectivamente).

Para el análisis se caracteriza el árido reciclado generado determinando la granulometría, contenido de fibras, absorción y densidad; y para los distintos tipos de hormigón realizados se analiza la resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia residual.

5.2. Caracterización del árido reciclado

- Considerando que, para la presente campaña experimental, el tamaño del árido reciclado utilizado es el árido grueso menor a 20mm (4/12 y 12/20mm), únicamente el 52% del total de árido reciclado generado es aprovechado. Es decir, siguiendo el proceso de trituración adoptado en este estudio, casi la mitad del material generado queda inutilizado, lo que refleja un relativo bajo rendimiento de la obtención del árido reciclado.

- Las fibras en el hormigón se adhieren al mortero y no ofrecen un tipo de refuerzo en la interfaz árido mortero. Como consecuencia la adherencia en el nuevo hormigón de las fibras que están embebidas en el mortero dependerá de la capacidad de adherencia de ese mortero en el nuevo hormigón.

- La absorción del RAF generado es casi 6 veces mayor que la del NA (debido al mortero adherido), encontrándose el valor dentro del rango habitual para áridos reciclados. Por otro lado, la densidad ODD del RAF presenta una disminución de aproximadamente 15% respecto a la densidad del NA, valor ligeramente mayor al habitual según la literatura sobre áridos reciclados.

5.3. Recuperación de fibras

- Existiría una relación entre la tasa de recuperación de fibras y el tamaño del árido. Cuanto menor es el tamaño del árido, mayor es la tasa de recolección de fibras libres (sin mortero adherido), esto debido al menor área superficial disponible en el árido para la adherencia del mortero con fibras.

- El método de flotación empleado para la recuperación de fibras en el presente estudio alcanza una tasa del 23.3%, tasa relativamente baja a comparación de otros estudios realizados con la misma técnica de recuperación, pero con fibras de mayor longitud. Es decir, mientras más corta es la fibra, menor sería la tasa de recuperación utilizando el método adoptado en este estudio.

5.4. Propiedades del hormigón

- Para alcanzar un asentamiento promedio de 12.5cm $\pm$ 2.5cm en los hormigones reciclados con fibras (para 3 y 9kg/m^3 de fibras), la cantidad de aditivo necesario se encuentra alrededor de los rangos habituales especificados por el fabricante (0.6 – 1.5%). En general, se obtiene que los hormigones con contenido de fibras de 9kg/m^3

son los que requieren mayor uso de aditivo para mantener la trabajabilidad, por ende, serían los que mayor impacto a nivel económico ocasionarían.

- El valor medio de la resistencia a compresión (f_{cm}) se reduce entre un 2 y 9% para los hormigones R30PS-9 y N30RF respecto al hormigón de referencia, reducción poco significativa. Asimismo, los valores de f_{cm} no estarían correlacionados con el contenido de fibras (3 o 9kg/m^3). Todos los hormigones fabricados alcanzan valores de f_{cm} superiores a la resistencia de diseño objetivo (30MPa).

- El valor medio del módulo de elasticidad (E_{cm}) se reduce entre 15 y 22% para los hormigones R30PS-9 y aumenta entre 5 y 9% para los hormigones N30RF, respecto al hormigón de referencia. Los resultados demostrarían una correlación en la calidad del árido (reciclado o natural) y el módulo de elasticidad. Por otro lado, los valores de E_{cm} no estarían correlacionados con el contenido de fibras (3 o 9kg/m^3) ni la calidad de estas (nuevas o recuperadas).

- En la resistencia residual, existiría una clara correlación entre el contenido de fibras (3 o 9kg/m^3) y el comportamiento post - fisuración del hormigón. Asimismo, se llegaría al aporte colateral de las fibras adheridas al árido reciclado en el RAF. Por otro lado, se evidenciaría la influencia entre la calidad del árido (reciclado o natural) y la primera carga de fisura.

  Por último, se determina la clase de resistencia post - fisuración de los diferentes hormigones, y se llega a que los hormigones con contenido de fibras de 9kg/m^3, (N30PS-9, R30PS-9-9 y N30RF-9), cumplen con los parámetros del Model Code 2010 para ser considerados como posible sustitución del refuerzo convencional para el estado límite último, mientras que los hormigones con contenido de fibras de 3kg/m^3 (R30PS-9-3 y N30RF-3) no cumplen con dichos parámetros.

Fruto de los resultados, análisis y conclusiones presentadas en este trabajo, se han identificado las siguientes líneas que requieren ser investigadas con el fin de alcanzar un mayor nivel de comprensión de los fenómenos observados:

- Estudios focalizados en el análisis de la zona de transición ITZ del hormigón para tener una visión más precisa en relación con el mortero adherido a la superficie del árido reciclado generado y así llegar a acciones para mejorar la calidad del árido.

- Desarrollar técnicas más eficientes para el conteo y recolección de fibras recicladas, para alcanzar mayores tasas de recolección en tiempos reducidos.

- La cuantificación de la energía consumida para la trituración del hormigón primario, para así desarrollar procesos óptimos que favorezcan una obtención de materiales competitiva respecto a los otros hormigones.

- Analizar el uso combinado de fibras recicladas y fibras nuevas, para así llegar a alcanzar un equilibrio entre el uso de material reciclado y el buen desempeño del hormigón reforzado con fibras.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmad, J., Aslam, F., Martínez-García, R., de Prado-Gil, J., Abbas, N., & El Ouni, M. (2021). Mechanical performance of concrete reinforced ith polypropylene fibers (PPFs). Journal of engineered fibers and fabrics, 1-17.

Aidarov, S., Nadazdi, A., Pugach, E., Tošić, N., & de la Fuente, A. (2022). Cost-oriented analysis of fibre reinforced concrete column-supported flat slabs construction. Journal of Building Engineering.

American Concrete Institute. (2019). Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.4R-18). Farmington Hills, MI.

Asociación Española de Normalización. (2008). UNE-EN 14889-2:2008 Fibras para hormigón - Parte 2: Métodos de ensayo. Madrid.

Asociación Española de Normalización. (2013). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1992-1-1. Madrid.

Berríos, L. (Agosto de 2014). Fibra Sintética Estructural para la construcción y minería. Obtenido de EMB Revista Construcción: https://www.emb.cl/construccion/index.mvc

CEDEX. (2011). Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Bilbao: Inhobe.

CEDEX. (2014). Residuos de Construcción y Demolición. España.

Del Río, M., Izquierdo, P., Salto, I., & Santa Cruz, J. (2010). La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la comunidad de Madrid. Informes de la Construcción, 81-86.

Eurostat. (2020). Generation of waste by waste category. Obtenido de http://epp.eurostat.ec.europa.eu/

Francis, I. (2017). The Effects of Recycled Aggregates on Compressive Strength of Concrete. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 250-258.

Gálvez, J., Styles, D., Schoenberger, H., & Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. Resources, Conservation & Recycling, 166-178.

González, B. (2002). Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Coruña: Tesis doctoral. Universidad da Coruña.

GRV Ambient. (s.f.). Árido reciclado. Obtenido de GRV Ambient: https://www.grvambient.com/servicios-planta-reciclaje/aridos-de-construccion/aridos-construccion-reciclado.html

Guía española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). (2020). Proyecto Gear.

Guzmán, J. (2015). Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias. Valencia: Trabajo de Investigación CST/MIH-0X. Ingeniería de la Construcción y proyectos de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia. .

Kunieda, M., Ueda, N., & Nakamura, H. (2014). Ability of recycling on fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials, 315-320.

Laserna, S. (2015). Avances en el comportamiento del hormigón reciclado: fabricación, propiedades mecánicas y simulación numérica. Albacete: Tesis doctoral. Universidad de Castilla - La Mancha.

Liu, G., Tošić, N., & de la Fuente, A. (2023). Recycling of Macro-Synthetic Fiber-Reinforced Concrete and Properties of New Concretes with Recycled Aggregate and Recovered Fibers. Applied Science.

Master Builders Solutions. (2021). Ficha técnica: MasterPozzolith 7003. Barcelona.

Master Builders Solutions. (s.f.). Technical data sheet: MasterFiber MAC 244. Estados Unidos.

Ministerio de Fomento. (2008). Anejo 15: Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. En M. d. Fomento, Instrucción de hormigón estructural (págs. 526-541). España.

Ministerio de Medio Ambiente. (2015). Plan Nacional Integrado de Residuos, 2008-2015 (PNIR). Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA).

Ministerio de Medio Ambiente. (2022). Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Legislación Consolidada BOE.

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). Código Estructural. Anejo 7: Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras. Madrid.

Ministerio del Medio Ambiente. (2009). Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015.

Pavón, E., Etxeberría, M., & Martínez, I. (2011). Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte. Revista de la Construcción, 4-15.

Pujadas, P. (2008). Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno. Barcelona: Tesina. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña.

Ramírez Sanchez-Maroto, C. (2021). Economía circular para los residuos de la construcción en España. Revista Andaluza de la Administración Pública, 309-345.

Redecan. (s.f.). Reciclajes del cantabrico. Obtenido de Redecan: http://reciclajesdelcantabrico.com/aridos-reciclados/

Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Madrid: Tesis. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. Construction and Building Materials, 201-2017.

Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2015). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. Journal of Cleaner Production.

Special Acticity Group, & New Model Code. (2013). Fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn, Wiley.

Tam, V., Soomro, M., Catarina, A., & Evangelista, J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). Construction and Building Materials, 272-292.

Tavakoli, M., & Soroushian, P. (1996). Strength of Recycled Aggregate Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate. ACI Material Journal 93, 182-190.

Texas Department of Transportation. (2019). Fiber Reinforced Concrete (FRC) Tip Sheet. Texas.

Tošić, N., Peralta, D., Hafez, H., Reynvart, I., Ahmad, M., Liu, G., & de la Fuente, A. (2022). Multi-recycling of polypropylene fibre reinforced concrete: Influence of recycled aggregate properties on new concrete. Construction and Building Materials.

Vidal, C. (2015). Estudio Comparativo de los Sistemas de Gestión de RCDs entre España y Brasil. Coruña: Trabajo Fin de Grado, Universidade da Coruña.