



**Tesis doctoral**

**DISEÑO DE ECO-HORMIGONES BASADOS  
EN LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS.  
NIVEL PRESTACIONAL Y DURABLE.**

*(Design of eco-concretes based on waste recovery. Performance  
and durability)*

**Pablo Plaza Caballero**

**Programa de doctorado en desarrollo territorial  
sostenible**

Conformidad del director y codirector:

Fdo: Dr. César Medina Martínez

Fdo: Javier Sánchez Montero

Esta tesis cuenta con la autorización del director y codirector de la misma y de la Comisión Académica del programa. Dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura

**2024**





## **TESIS DOCTORAL**

**TÍTULO (en español):** Diseño de eco-hormigones basados en la valorización de residuos. Nivel prestacional y durable.

**NOMBRE Y APELLIDOS DEL AUTOR:**

**PABLO PLAZA CABALLERO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO:**

**Desarrollo Territorial Sostenible**

Conformidad del director y codirector:

Fdo: Dr. César Medina Martínez

Fdo: Javier Sánchez Montero

Esta tesis cuenta con la autorización del director y codirector de la misma y de la Comisión Académica del programa. Dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura

AÑO DE LECTURA

2024





*A mi familia*



*“La ciencia más útil es aquella cuyo  
fruto es el más comunicable”*

Leonardo da Vinci



## *Agradecimientos*

La presente Tesis doctoral ha podido realizarse gracias a la financiación recibida de las siguientes instituciones:

- Ayudas para la financiación de contratos predoctorales para la formación de doctores en los centros públicos de I+D pertenecientes al Sistema Extremeño de Ciencia, Tecnología e Innovación, de la Consejería de Economía e Infraestructuras de la Junta de Extremadura (PD18078)
- Ayudas para contratos predoctorales para la Formación del Profesorado Universitario del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, en la convocatoria 2019 (FPU19/06704)
- Proyecto “0008\_ECO2CIR\_4\_E-Proyecto de cooperación transfronteriza para la introducción de la economía ecológica y circular mediante la prevención, mejora del reciclaje, de la gestión y de la valorización de residuos en las regiones de Centro, Extremadura y Alentejo” de la convocatoria INTERREG-POCTEP, financiado por el Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER)
- Proyecto Nacional BIA2016-76643-C3-1-R “Estructuras de hormigón armado recicladas de bajo contenido en clinker y su ciclo de vida en el contexto de una economía circular”, del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los retos de la sociedad del Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Proyecto PDC2022-133285-C21, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación
- Fondos “European Union NextGenerationEU/PRTR”
- Proyecto PID2022-136244OB-I00 - MICIU/AEI/10.13039/501100011033, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades
- Proyecto IB 20131, financiado por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (ERDF)
- Ayudas a grupos de investigación GR18122 concedidas por el FEDER y la Junta de Extremadura.

Igualmente, quiero expresar mi agradecimiento a continuación a todas las personas que me han acompañado durante la realización de esta Tesis Doctoral, y sin los cuales no habría sido posible realizar esta labor de investigación y aprendizaje, tanto laboral como personal.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directores de Tesis su tiempo, esfuerzo y orientación a lo largo de la realización de este trabajo de investigación: el Doctor César Medina Martínez y el Doctor Javier Sánchez Montero, así como a la Doctora Isabel Fuencisla Sáez del Bosque. Por

las innumerables horas de disponibilidad y apoyo que han permitido desarrollar esta investigación y por introducirme al mundo de la investigación, que nunca fue mi primera opción.

Para continuar, al grupo de Corrosión de Armaduras y Seguridad Estructural del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), donde pude conocer el trabajo de investigación fuera del ámbito universitario y descubrir nuevas líneas y enfoques de investigación. Javier, Servando, Nuria, Elena, Julio y Antonio, muchas gracias por el maravilloso año que compartimos y que supuso mi primer trabajo como investigador.

A continuación, merece el mayor de los agradecimientos el personal del laboratorio de Materiales de la Escuela Politécnica de Cáceres, donde se ha desarrollado la mayoría del trabajo que se expone en esta Tesis. Asimismo, a mis compañeros de doctorado, con quien pude descubrir en qué consistía “eso de ser investigador”. Juan Carlos, Carmen, Blas y Paula, muchas gracias por acompañarme en esta carrera de fondo donde hemos podido compartir tantos momentos.

Por último, agradecer a mi familia y amigos por proporcionarme el apoyo necesario para recorrer este camino, sin vosotros no hubiera sido posible completar esta tarea.

Muchas gracias a todos.

## *Resumen*

El sector de la construcción se caracteriza por ser un gran demandante de recursos naturales, así como una de las actividades que más cantidad de residuos genera durante todas las fases del proceso constructivo (construcción, mantenimiento y demolición). Concretamente, en el conjunto de la UE la cantidad de residuos generados en el sector de la construcción ha ido en aumento en los últimos años, hasta alcanzar un 37% del total de residuos generados. En este contexto, el sector de la construcción se caracteriza por ser uno de los sectores más atractivos y con mayor capacidad para la valorización de los residuos generados, bien en su propia actividad como de otra tipología de residuos industriales, debido a sus características intrínsecas, tales como gran variedad de productos finales y elevada demanda de materias primas.

En este sentido, la industria del hormigón requiere la incorporación en su proceso tecnológico de materias primas secundarias procedentes de los residuos de construcción y demolición (RCD), bien como árido reciclado o como componentes de nuevos cementos, permitiendo de este modo implementar el concepto de economía circular y la reducción de su impacto en el medio ambiente por un menor consumo de recursos naturales y una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, la mayoría de países limitan el uso de áridos reciclados, restringiéndolo al uso de la fracción gruesa de áridos procedentes del machaqueo de hormigón para porcentajes de sustitución pequeños (20-30%), debido a la calidad inferior de estos áridos reciclados y una mayor incertidumbre a la hora de estimar sus propiedades. En cualquier caso, en los últimos años se ha estudiado la viabilidad de incorporar este tipo de áridos en hormigón estructural, encontrando un consenso en el que para porcentajes de sustitución inferiores a un 30% las prestaciones de los nuevos hormigones se conservan e incluso mejoran no siendo tan dependientes los resultados obtenidos de la calidad y origen de las arenas finas recicladas. Sin embargo, es necesario profundizar en el análisis de este tipo de estudios acerca de la viabilidad de incorporar todo tipo de áridos procedentes de RCD, lo que contribuye a cerrar el ciclo de vida de las estructuras de hormigón o mixtas en el ámbito de una economía circular.

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es estudiar desde el punto de vista estadístico el comportamiento mecánico y durable de hormigones que incluyen en su composición áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), tanto procedentes exclusivamente del machaqueo de hormigón como de residuos mixtos, así como su viabilidad para ser utilizados en aplicaciones estructurales. Para alcanzar este objetivo se han dividido las mezclas objeto de estudio en dos grupos: a) mezclas que incorporan simultáneamente la fracción gruesa (total o parcialmente) de áridos reciclados procedentes del machaqueo de hormigón con un 50% de arena reciclada, tanto procedente del machaqueo de hormigón como mixta; y b)

mezclas que sustituyen total o parcialmente todas las fracciones de los áridos naturales por áridos reciclados procedentes exclusivamente del machaqueo de hormigón.

La investigación del primer grupo de mezclas consistió en analizar el efecto de sustituir parcial y simultáneamente la fracción gruesa del árido natural por árido reciclado (25%, 50%, 75% y 100%) con un 50% de la fracción fina de arena reciclada de hormigón o mixta en el diseño de hormigones estructurales con una resistencia característica de 30 MPa (C30/37). Para ello, se estudiaron las propiedades en estado fresco (consistencia, densidad y aire ocluido) y endurecido (resistencia a compresión, tracción y flexión) de los hormigones, así como los beneficios ambientales de estos nuevos hormigones reciclados mediante la cuantificación de la intensidad de recursos naturales y la estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de estas nuevas formulaciones. Asimismo, los resultados de resistencia han sido analizados desde el punto de vista estadístico a través de un análisis de varianza (ANOVA) para estudiar si los efectos relativos e interferencias de las variables son significativos. Finalmente, se han obtenido varias expresiones matemáticas que permiten calcular indirectamente los valores de tracción y flexión a partir de los valores medios de compresión, comparándolas con las existentes en la literatura y en los códigos estructurales.

Por otro lado, La investigación del segundo grupo de mezclas consistió en profundizar en el estudio del comportamiento físico-mecánico de los hormigones que incluyen simultáneamente árido grueso y fino procedente del machaqueo de hormigón. Concretamente, este trabajo analiza el efecto de sustituir parcial (25, 50 y 75%) o totalmente (100%) la fracción gruesa del árido natural por árido reciclado y a su vez sustituir parcialmente (10, 20 y 50%) la fracción fina del árido en el diseño de hormigones estructurales de clase C30/37 (resistencia característica de 30 N/mm<sup>2</sup>). Para ello, se han estudiado las propiedades en estado fresco (densidad, consistencia y aire ocluido) y endurecido (resistencias a compresión y flexión y penetración de agua bajo presión) de los hormigones. Estos resultados se han analizado desde el punto de vista estadístico mediante dos técnicas: en el caso de la densidad se ha estudiado un modelo de regresión lineal en función del porcentaje total de árido sustituido y en el resto de propiedades se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA) con 2 factores e interacción, que analiza los efectos relativos e interferencias de sustituir las fracciones gruesa y fina tanto por separado como simultáneamente, indicando qué cambios en las propiedades estudiadas son significativos desde un punto de vista estadístico.

Los resultados obtenidos en ambos grupos de análisis permiten concluir que todas las mezclas estudiadas pueden utilizarse desde el punto de vista prestacional en la fabricación de hormigón estructural de clase C30/37, consiguiendo unas prestaciones ligeramente inferiores a las mezclas de referencia, con pérdidas asumibles en todo caso. Además, el Global Warming Potential (GWP)



y la eco-eficiencia resistente arrojan datos positivos, por lo que la utilización de este tipo de hormigones permite una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>.



## *Abstract*

The construction sector is characterized by its high demand for natural resources, as well as being one of the activities that generate the greatest amount of waste during all phases of the construction process (construction, maintenance and demolition). Specifically, in the EU the amount of waste generated in the construction sector has been increasing in recent years, reaching 37% of the total waste generated. In this context, the construction sector is characterized as one of the most attractive sectors with the greatest capacity for the recovery of waste generated, either in its own activity or from other types of industrial waste, due to its intrinsic characteristics, such as a wide variety of end products and high demand for raw materials.

In this sense, the concrete industry requires the incorporation of secondary raw materials from construction and demolition waste (CDW) into its technological process, either as recycled aggregate or as components of new cements, thus allowing the implementation of the circular economy concept and the reduction of its impact on the environment through lower consumption of natural resources and a reduction in CO<sub>2</sub> emissions.

However, most countries limit the use of recycled aggregates, restricting it to the use of the coarse fraction of aggregates from concrete crushing for small replacement percentages (20-30%), due to the inferior quality of these recycled aggregates and greater uncertainty when estimating their properties. In any case, in recent years, the feasibility of incorporating this type of aggregate in structural concrete has been studied, and a consensus has been found that for replacement percentages of less than 30%, the performance of the new concretes is preserved and even improved, the results obtained not being so dependent on the quality and origin of the fine recycled sands. However, it is necessary to deepen the analysis of this type of studies on the feasibility of incorporating all types of aggregates from CDW, which contributes to closing the life cycle of concrete or mixed structures in the context of a circular economy.

The general objective of this Doctoral Thesis is to study from a statistical point of view the mechanical and durable behavior of concretes that include in their composition recycled aggregates from Construction and Demolition Waste (CDW), both from concrete crushing and from mixed waste, as well as their viability for use in structural applications. To achieve this objective, the mixtures under study have been divided into two groups: a) mixtures that simultaneously incorporate the coarse fraction (totally or partially) of recycled aggregates from concrete crushing with 50% recycled sand, both from concrete crushing and mixed; and b) mixtures that totally or partially replace all the fractions of natural aggregates with recycled aggregates exclusively from concrete crushing.

The investigation of the first group of mixtures consisted of analyzing the effect of partially and simultaneously replacing the coarse fraction of the natural aggregate with recycled aggregate (25%, 50%, 75% and 100%) with 50% of the fine fraction of recycled concrete or mixed sand in the design of structural concretes with a characteristic strength of 30 MPa (C30/37). To this end, the fresh (consistency, density and entrained air) and hardened (compressive, tensile and flexural strength) properties of the concretes were studied, as well as the environmental benefits of these new recycled concretes by quantifying the natural resource intensity and estimating the CO<sub>2</sub> emissions of these new formulations. Likewise, the strength results have been analyzed from a statistical point of view through an analysis of variance (ANOVA) to study whether the relative effects and interferences of the variables are significant. Finally, several mathematical expressions have been obtained to calculate indirectly the tensile and bending values from the average compression values, comparing them with those existing in the literature and in the structural codes.

On the other hand, the investigation of the second group of mixtures consisted of an in-depth study of the physical-mechanical behavior of concretes that simultaneously include coarse and fine aggregate from concrete crushing. Specifically, this work analyses the effect of partially (25, 50 and 75%) or totally (100%) replacing the coarse fraction of the natural aggregate with recycled aggregate and in turn partially (10, 20 and 50%) replacing the fine fraction of the aggregate in the design of structural concretes of class C30/37 (characteristic strength of 30 N/mm<sup>2</sup>). To this end, the fresh (density, consistency and entrained air) and hardened (compressive and flexural strengths and water penetration under pressure) properties of the concretes were studied. These results have been analyzed from a statistical point of view using two techniques: in the case of density, a linear regression model has been studied as a function of the total percentage of aggregate replaced, and for the other properties, an analysis of variance (ANOVA) with 2 factors and interaction has been carried out, which analyses the relative effects and interferences of replacing the coarse and fine fractions both separately and simultaneously, indicating which changes in the properties studied are significant from a statistical point of view.

The results obtained in both groups of analysis allow us to conclude that all the mixtures studied can be used from the performance point of view in the manufacture of structural concrete of class C30/37, achieving slightly lower performance than the reference mixtures, with acceptable losses in any case. In addition, the Global Warming Potential (GWP) and the eco-strength efficiency show positive data, so the use of this type of eco-concrete allows a reduction in CO<sub>2</sub> emission.

## *Índice de contenidos*

Capítulo 1. Introducción.....	- 1 -
1    La problemática de los residuos de construcción y demolición .....	- 1 -
2    Marco normativo .....	- 2 -
2.1    Normativas de gestión de residuos.....	- 2 -
2.1.1    Directiva UE 2018/851, de 30 de mayo, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.....	- 3 -
2.1.2    Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2023-2035.....	- 5 -
2.1.3    Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2023-2030.....	- 6 -
2.2    Normativa de hormigón estructural.....	- 6 -
3    Necesidad y viabilidad de la utilización de áridos reciclados .....	- 10 -
4    Coherencia e importancia unitaria de la Tesis Doctoral .....	- 14 -
5    Descripción de las publicaciones .....	- 16 -
5.1    Reutilización integral de los áridos reciclados en el diseño de eco-hormigones estructurales. Propiedades físicas, mecánicas y emisiones de co2.....	- 16 -
5.2    Eco-hormigones reciclados formulados con fracción fina y/o gruesa de hormigón. Comportamiento prestacional .....	- 17 -
6    Referencias Bibliográficas.....	- 18 -
Capítulo 2. Objetivos .....	- 23 -
1    Objetivo general de la Tesis Doctoral: .....	- 23 -
2    Objetivos específicos de la Tesis Doctoral .....	- 23 -
Capítulo 3. Metodología.....	- 25 -
1    Materiales .....	- 25 -
2    Diseño y fabricación de las mezclas.....	- 26 -
3    Propiedades estudiadas .....	- 28 -
4    Análisis estadístico .....	- 30 -
5    Referencias bibliográficas.....	- 32 -
Capítulo 4. Resultados .....	- 35 -
1    Caracterización de los áridos .....	- 35 -

2	Propiedades en estado fresco .....	- 38 -
3	Propiedades en estado endurecido.....	- 41 -
3.1	Densidad aparente .....	- 41 -
3.2	Porosidad .....	- 43 -
3.3	Resistencia a compresión.....	- 44 -
3.3.1	Análisis estadístico de las mezclas del grupo 1 .....	- 44 -
3.3.2	Análisis estadístico de las mezclas del grupo 2 .....	- 47 -
3.3.3	Evolución de resistencias .....	- 49 -
3.4	Resistencia a tracción indirecta.....	- 51 -
3.5	Resistencia a flexión.....	- 54 -
3.5.1	Análisis estadístico de las mezclas del grupo 1 .....	- 54 -
3.5.2	Análisis estadístico de las mezclas del grupo 2 .....	- 56 -
3.6	Penetración de agua bajo presión.....	- 58 -
4	Emisiones de dióxido de carbono.....	- 60 -
4.1	Emisiones de CO <sub>2</sub> . Global Warming Potential (GWP).....	- 60 -
4.2	Eco-eficiencia resistente .....	- 63 -
5	Referencias bibliográficas.....	- 65 -
	Capítulo 5. Conclusiones.....	- 73 -
	Capítulo 6. Publicaciones .....	- 75 -

## *Índice de tablas*

<b>Tabla 1.</b> Marco normativo del uso de áridos reciclados en hormigones [32, 33] .....	- 7 -
<b>Tabla 2.</b> Dosificación .....	- 27 -
<b>Tabla 3.</b> Propiedades estudiadas en los áridos .....	- 29 -
<b>Tabla 4.</b> Propiedades estudiadas en los hormigones .....	- 29 -
<b>Tabla 5.</b> Comprobaciones de homocedasticidad y normalidad del primer grupo de análisis.	- 31 -
<b>Tabla 6.</b> Comprobaciones de homocedasticidad y normalidad del segundo grupo de análisis.	- 32 -
-	
<b>Tabla 7.</b> Propiedades físicas, mecánicas y químicas de los áridos.....	- 36 -
<b>Tabla 8.</b> Propiedades en estado fresco .....	- 39 -
<b>Tabla 9.</b> Propiedades del sistema poroso.....	- 43 -
<b>Tabla 10.</b> Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a compresión. Grupo 1. ....	- 46 -
<b>Tabla 11.</b> Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a compresión. Grupo 2. ....	- 49 -
<b>Tabla 12.</b> Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a tracción indirecta. Grupo 1....	- 52 -
<b>Tabla 13.</b> Expresiones propuestas por otros autores .....	- 53 -
<b>Tabla 14.</b> Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a flexión. Grupo 1. ....	- 55 -
<b>Tabla 15.</b> Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a flexión. Grupo 2. ....	- 57 -
Tabla 16. Profundidades media y máxima de penetración de agua bajo presión .....	- 58 -
<b>Tabla 17.</b> Parámetros del modelo ANOVA para penetración media de agua bajo presión. Grupo 2. ....	- 59 -
<b>Tabla 18.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> en el proceso de fabricación de los materiales y de las mezclas de hormigón por m <sup>3</sup> .....	- 61 -





## Índice de figuras

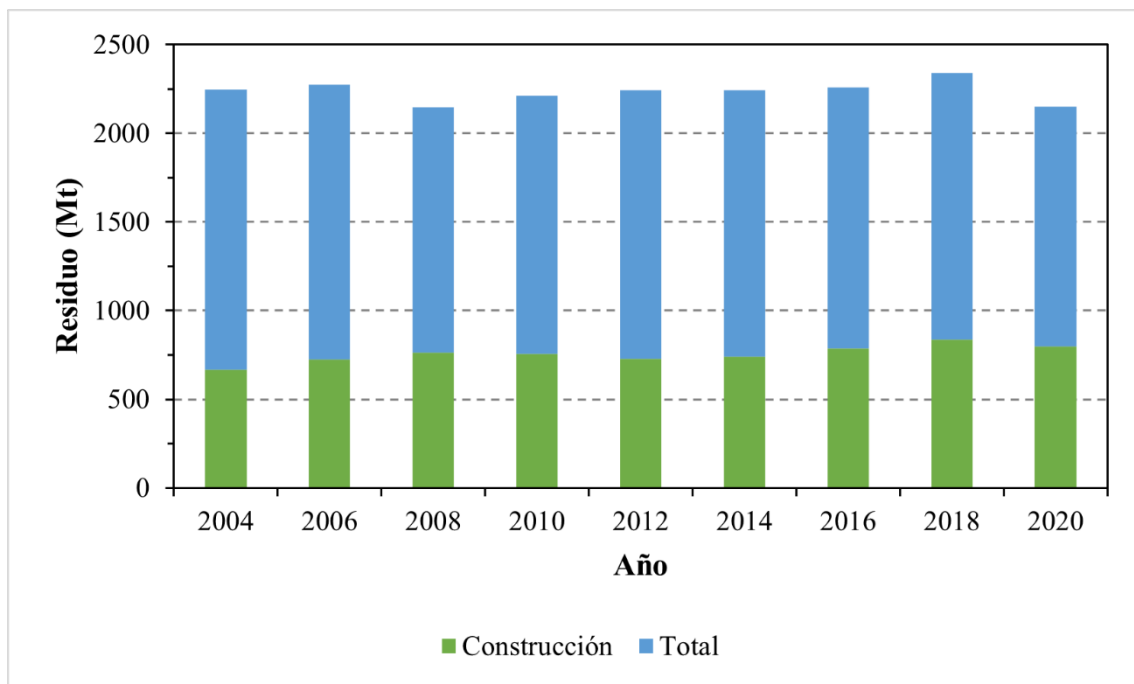
<b>Figura 1.</b> Residuos generados en la UE-27 en el periodo 2004-2020. ....	- 1 -
<b>Figura 2.</b> Diagrama sobre economía circular [23] .....	- 3 -
<b>Figura 3.</b> Jerarquía de residuos en los modelos lineal (izquierda) y circular (derecha). ....	- 4 -
<b>Figura 4.</b> a) Grava natural (GN); b) Gravilla natural (gN); y c) Arena natural (AN) .....	- 25 -
<b>Figura 5.</b> Grava reciclada de hormigón (GH); b) Gravilla reciclada de hormigón (gH); c) Arena de hormigón (AH); y d) Arena mixta (AM). ....	- 26 -
<b>Figura 6.</b> Diagrama de fabricación de los hormigones.....	- 28 -
<b>Figura 7.</b> Resultados de clasificación composicional para: (a) gH y (b) GH. ....	- 35 -
<b>Figura 8.</b> Distribución granulométrica de los áridos.....	- 37 -
<b>Figura 9.</b> Reacción álcali – sílice de los áridos reciclados .....	- 38 -
<b>Figura 10.</b> Densidad en estado fresco agrupada según el contenido de árido fino reciclado	- 40 -
<b>Figura 11.</b> Densidad en estado fresco de las mezclas que contienen árido reciclado de hormigón	- 41 -
<b>Figura 12.</b> Variación de la densidad aparente en estado endurecido .....	- 41 -
<b>Figura 13.</b> Densidad aparente de las mezclas que incluyen árido de hormigón .....	- 42 -
<b>Figura 14.</b> Distribución de tamaño de poro de los hormigones estudiados a los 28 días de curado	- 44 -
<b>Figura 15.</b> Resistencia a compresión simple sobre probeta de 15x15x15 cm <sup>3</sup> Grupo 1. ....	- 45 -
<b>Figura 16.</b> Resistencia a compresión simple sobre probeta de 15x15x15 cm <sup>3</sup> Grupo 2. ....	- 47 -
<b>Figura 17.</b> Resistencia relativa a 7 y 90 días. ....	- 50 -
<b>Figura 18.</b> Forma de rotura para las mezclas HP (izquierda) y HR-100+50M (derecha). ....	- 50 -
<b>Figura 19.</b> Resistencia a tracción indirecta.....	- 51 -
<b>Figura 20.</b> Distribución de los diferentes componentes del árido en el hormigón.....	- 54 -
<b>Figura 21.</b> Resistencia a flexión. Análisis grupo 1. ....	- 54 -
<b>Figura 22.</b> Resistencia a flexión. Análisis grupo 2. ....	- 56 -
<b>Figura 23.</b> Global warming potential (GWP) por metro cúbico de hormigón en función del porcentaje de sustitución de árido grueso reciclado de hormigón .....	- 62 -
<b>Figura 24.</b> Eficiencia de los hormigones con respecto a la resistencia (compresión – $f_{cm}$ , tracción – $f_{ct}$ y flexión – $f_{ct,m,fl}$ ) y emisiones CO <sub>2</sub> .....	- 63 -
<b>Figura 25.</b> Relación entre el GWP y $f_{cm}$ de los hormigones reciclados .....	- 64 -



# Capítulo 1. Introducción

## 1 LA PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

El sector de la construcción se caracteriza por ser un gran demandante de recursos naturales, así como una de las actividades que más cantidad de residuos genera durante todas las fases del proceso constructivo (construcción, mantenimiento y demolición). Concretamente, en el conjunto de la UE la cantidad de residuos generados en el sector de la construcción ha ido en aumento en los últimos años. Según Eurostat [1], en el periodo 2004-2020 se han generado en el conjunto de la UE-27 un total de 6.81 Gt de residuos en el sector de la construcción, aumentando su importancia año tras año, pasando de representar un 29.66% del total de residuos en 2004 a un 37.11% del total en el año 2020 (Figura 1).



**Figura 1.** Residuos generados en la UE-27 en el periodo 2004-2020.

En este contexto, el sector de la construcción se caracteriza por ser uno de los sectores más atractivos y con mayor capacidad para la valorización de los residuos generados, bien en su propia actividad como de otra tipología de residuos industriales, debido a sus características intrínsecas, tales como gran variedad de productos finales y elevada demanda de materias primas. En este contexto, según datos de la Asociación Europea de Áridos (UEPG) en el año 2018 [2], este sector demandó 3 billones de toneladas por año de árido, de los cuales más de un 84% procede de la

explotación de canteras o graveras naturales. De estos, aproximadamente el 45% de son empleados en la industria del hormigón, bien en hormigón premezclado (~25%), piezas prefabricadas (~25%) o productos de hormigón destinados a la arquitectura (~5%).

En este sentido, la industria del hormigón requiere la incorporación en su proceso tecnológico de materias primas secundarias procedentes de los residuos de construcción y demolición (RCD), bien como árido reciclado [3, 4] o como componentes de nuevos cementos [5-7] [8] permitiendo de este modo implementar el concepto de economía circular y la reducción de su impacto en el medio ambiente por un menor consumo de recursos naturales y una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> [9]. Por ejemplo, según Alnahhal et al. [10] la sustitución de árido machacado de granito en su totalidad por árido grueso reciclado provoca un descenso del 7% de emisiones de CO<sub>2</sub>. Se estima que, a nivel mundial, el sector de la construcción es responsable de un 33% de las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> [11] y un 40% del consumo global de energía [12]. El alto consumo de energía y emisiones responde a motivos de la propia fabricación de los componentes del hormigón, especialmente del cemento, que suponen un 73% del total de emisiones en el sector [13] y al transporte de estos componentes. En este sentido, desde el punto de vista logístico el uso de materiales reciclados puede suponer una gran ventaja, ya que la distancia debida al transporte de materias primas se reduce al disponer en todo el territorio de residuos de construcción y demolición susceptibles de ser convertidos en áridos reciclados [14], especialmente en zonas donde el árido natural es escaso y/o imposible de extraer [15]. Asimismo, el impacto ambiental disminuye notablemente al reducir tanto la explotación de recursos naturales en canteras como el depósito de residuos en vertedero [16]. En su conjunto, en uso de árido reciclado grueso puede reducir hasta en un 65% las emisiones de gases de efecto invernadero [17], porcentaje que puede incluso aumentar si se añade el árido fino, lo que sería interesante ya que el consumo de arena a nivel mundial se incrementa año a año, con una estimación de 47.5 billones de toneladas para 2023 [18] y hasta 60 billones de toneladas para 2030 [19].

## **2 MARCO NORMATIVO**

---

### **2.1 NORMATIVAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS**

La gran cantidad de residuos generados en el sector de la construcción junto al impacto ambiental que estos provocan ha llevado a la aprobación a nivel comunitario de numerosas políticas de desarrollo sostenible y lucha contra el cambio climático, tales como la “*Estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador*” [20], el acuerdo de París [21] o la Agenda 2030 [22], cuyas directrices promueven una transformación del modelo productivo para asumir un modelo circular (Figura 2), más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. En este modelo

los residuos generados se gestionan de forma correcta, reincorporándolos al proceso productivo, reduciendo la sobreexplotación de materias primas y aumentando al máximo el ciclo de vida de los materiales.



**Figura 2.** Diagrama sobre economía circular [23]

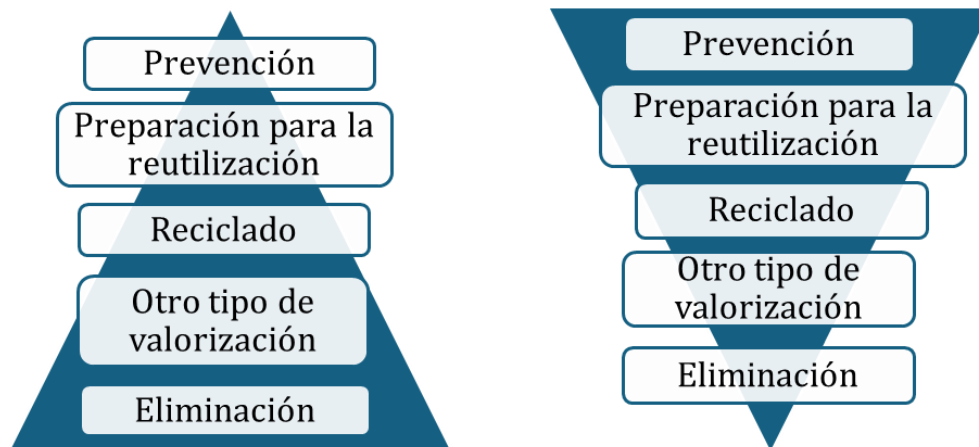
Como marco normativo en el ámbito de la Unión Europea, la normativa de referencia en materia de residuos es la Directiva UE 2018/851, que sirve como marco para el desarrollo de normativas a nivel nacional y autonómico. En este caso, los documentos analizados en el presente estudio son:

- i) La Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos [24]
- ii) La versión inicial del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2023-2035 [25]
- iii) El Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2023-2030 [26]

### **2.1.1 Directiva UE 2018/851, de 30 de mayo, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos**

La Directiva 2018/851 surge de la necesidad de actualizar y adaptar a normativas posteriores la Directiva 2008/98/CE [27], conocida como la Directiva Marco de Residuos (DMR), que estableció las bases para adoptar el modelo de economía circular desarrollado con más detalle en la Estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador mencionada anteriormente, así como en diversas comunicaciones donde se desarrolla el modelo de economía circular (ver Figura 2). La DMR adopta por primera vez el concepto de jerarquía de residuos, que consiste en el cambio de prioridad a la hora de gestionar el ciclo de vida del modelo productivo, transformando la economía adoptada tras la Revolución Industrial, que consistía en un modelo

lineal donde los recursos naturales se convierten en materias primas, que dan lugar a productos que una vez consumidos generan una serie de residuos que se desechan, habitualmente mediante depósito en vertedero. La actualización de ese modelo lineal a uno circular implica un cambio de paradigma en la prioridad sobre las operaciones de tratamiento y gestión de residuos. La Figura 3 muestra un esquema con la jerarquía correspondiente a los modelos lineal y circular.



**Figura 3.** Jerarquía de residuos en los modelos lineal (izquierda) y circular (derecha).

Como se puede apreciar, las operaciones de prevención pasan a ser prioritarias, mientras que la eliminación solo se realizaría con los residuos que no fueran susceptibles de reutilizarse. En este caso, la DMR proporciona varias definiciones sobre los términos expresados hasta ahora:

- Residuo: cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse.
- Gestión de residuos: la recogida, transporte, valorización y eliminación de los residuos.
- Recogida: operación que consiste en el transporte, clasificación y almacenamiento de los residuos para su posterior tratamiento en una instalación adecuada.
- Prevención: medidas adoptadas para reducir la cantidad de residuo generado, el impacto sobre el medio ambiente o el contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.
- Valorización: cualquier operación cuyo resultado sea que el residuo sustituya a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función en particular.
- Eliminación: cualquier operación que no sea la valorización de un residuo.
- Subproducto: sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto.

En el caso de la Directiva 2018/851, las principales modificaciones que actualizan la DMR se refieren a la mejora de la eficiencia energética, la minimización de la dependencia de agentes externos a la Unión y la mejora de la competitividad mediante el aprovechamiento de subproductos y la valorización de residuos de menor valor. Con estos cambios se pretende mejorar

el sistema productivo de la Unión Europea, incrementando la sostenibilidad en la cadena de gestión de los recursos naturales, la salud y el medio ambiente.

La opción principal definida en la jerarquía de residuos establecida en la DMR es la prevención, ya que el residuo mejor gestionado es aquel que no se ha generado. La Directiva 2018/851 establece que todos los Estados miembros deben adoptar una serie de medidas para mejorar la eficiencia del proceso. A modo de resumen, cabe destacar las siguientes:

- Fomento de la reparación de productos, adoptando lo que se conoce como “diseño verde” para facilitar las operaciones de reparación y sustitución de componentes, especialmente en aparatos electrónicos, envases, etc. Asimismo, se debe fomentar la reutilización de productos tales como los materiales de construcción, envases o textiles.
- Reducción de generación de residuos en actividades industriales tales como extracción de minerales o materias primas, procesos de producción industrial o actividades de construcción y demolición.
- Valorización de residuos que no sea posible preparar para su reutilización o reciclado, remarcando la importancia de la jerarquía de residuos con el objeto de aumentar la eficiencia de la cadena de producción y aumentar la productividad.

Al igual que en el caso de la DMR, la Directiva insta a los Estados miembros a desarrollar su propia normativa que incluya los preceptos anteriormente expuestos.

### **2.1.2 Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2023-2035**

El Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) actual sustituye al aprobado anteriormente, que estuvo vigente durante el periodo 2016-2022 [28]. Además, incluye las novedades de la ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular [29], que sustituye a la ley anterior, aprobada en el año 2011 [30].

En él se desarrollan las políticas de residuos en España, además de analizar la situación actual e incluir una serie de recomendaciones y una clasificación de los tipos de residuos que se tratan en el documento. La principal novedad con respecto al plan anterior se centra en la actualización recogida en la ley 7/2022, que se centra en la actividad de eliminación de residuos en vertedero. En este caso, se insiste en los potenciales efectos adversos de estas instalaciones en el medio ambiente, el rechazo social que produce en los vecinos la proximidad de este tipo de instalaciones, la relevancia de una adecuada gestión de residuos para minimizar el volumen de eliminación por deficiencias en las fases previas de la gestión, especialmente en los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por su dificultad para gestionar adecuadamente sin una separación previa y los residuos de construcción y demolición (RCD), por su volumen y contaminación visual y acústica en las plantas de gestión.

### **2.1.3 Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2023-2030**

Como último paso en el establecimiento de normativa, a nivel regional se adapta el plan marco creando el Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2023-2030, que sustituye al plan anterior, vigente entre 2016 y 2022 [31]. Este plan dibuja la estrategia a seguir en este periodo, así como los retos a los que se enfrenta la región en los próximos años en materia de gestión de residuos, además de incluir programas de prevención para cada tipo (flujo) de residuos y el establecimiento de una Comisión de Seguimiento.

En este plan se definen las nuevas instalaciones de tratamiento de residuos, detalladas en la Ley 7/2022. En este caso, se establece que debe ser el plan regional el que incluya la siguiente información:

- Criterios de protección medioambiental: afección de zonas de protección de flora, fauna, medio hidrogeológico, patrimonio, etc.
- Ubicación de las instalaciones para un adecuado servicio en todo el territorio, así como una conexión adecuada a las vías de comunicación disponibles
- Legislación y ordenanzas locales, gestionadas por los ayuntamientos.
- Capacidad de gestión de las plantas en tareas de valorización y/o eliminación para un dimensionamiento adecuado de las mismas.

Para finalizar, el documento estima los fondos necesarios para ejecutar el plan, con las inversiones públicas previstas y la financiación privada mediante la recaudación de las tasas correspondientes por la manipulación y gestión de los diferentes tipos de residuos.

## **2.2 NORMATIVA DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL**

Resultado de esta investigación, se ha desarrollado en algunos países un marco normativo que limita la posibilidad de utilizar árido reciclado, principalmente aquel procedente de machaqueo de hormigón (RCA), en la fabricación de hormigones. La Tabla 1 muestra una revisión de la normativa más relevante que contempla el uso de RCA, indicando la fracción granulométrica permitida, porcentaje máximo de sustitución y clase resistente máxima. Asimismo, se recoge también áridos reciclados de hormigón que por su composición ( $5\% \leq R_b \leq 30\%$ ) son considerados en otras clasificaciones internacionales como áridos reciclados mixtos (celdas sombreadas de la Tabla 1).



**Tabla 1.** Marco normativo del uso de áridos reciclados en hormigones [32,33]

País	Tipo de árido	Composición	Tamaño	Porcentaje máx. (%)	Tipo de hormigón	Clase resistente
Australia AS 1141.62 / HB 155:2002	RCA (Class 1A)	-	Grueso	30	Estructural	C40/50
	MRA (Class 1B)	Rb < 30%		100	Estructural	C25/30
China GB/T-25177	RCA - Type I	-	Grueso	100	Estructural	Sin límite
	RCA - Type II	-		30	Estructural	C40/50
	RCA - Type III	-		30	Estructural	C25/30
	RCA - Type I	-	Fino	100	Estructural	C40/50
	RCA - Type II	-		30	Estructural	C25/30
	RCA - Type III	-		30	No Estructural	-
Korea KS-F-2573	RCA	-	Grueso	30	Estructural	27 MPa
		-	Grueso + Fino	30	No Estructural	21 MPa
Hong – Kong CS-3:2013/ HKBD 2009/ WBTC-No. 12	RCA	-	Grueso	20	Estructural	C25/30 – C35/45
		-		100	No Estructural	
Japan JIS-5021/ JIS-5022/ JIS-5023	RCA -HQ	-	Grueso	100	Estructural	C45/55
		-	Fino	100		
	RCA - MQ	-	Grueso	100	Estructural	C35/45
		-	Fino	100		
	RCA - LQ	-	Grueso	Sin límite	No Estructural	-
		-	Fino			
Belgium PTV 406-2003/ NBN B 15-001	RCA - Type A	Rc+Ru>95, Ra<1	Grueso	50, 30, 20*	Estructural	C30/37
	MRA - Type B	Rc+Ru>70, Rb<30, Ra<5	Grueso	20	No Estructural	C20/25
Germany DIN 4226-101, DAfStb	RCA - Type A	Rc+Ru>90, Rb<10, Ra<1	Grueso	45, 35, 25*	Estructural	C30/37
	MRA - Type B	Rc+Ru>70, Rb<30, Ra<1	Grueso	35, 25*	Estructural	C30/37

*Nota. – RCA: recycled concrete aggregate; MRA: mixed recycled aggregate; HQ: high quality; MQ: medium quality; LQ: low quality; Rc: hormigón y mortero adherido; Ru: árido deslizado; Rb: material cerámico; Ra: asfalto; y \*Porcentaje de sustitución en función de la clase de exposición ambiental. A clase de exposición más agresiva menor porcentaje de sustitución*

**Tabla 1.** (continuación)

País	Tipo de árido	Composición	Tamaño	Porcentaje máx. (%)	Tipo de hormigón	Clase resistente
Italy NTC-2008	RCA 1	Rc+Ru>95	Grueso	30	Estructural	C30/37
	RCA 2			60		C25/30
	MRA	-	Grueso	15	No Estructural	C45/55
Denmark DS 2426/ DCA No. 34	RCA 1	Rc+Ru>95	Grueso	100	Estructural	C40/50
	RCA 2		Grueso y fino	100		
	MRA	Rc+Ru<95	Grueso	100	No Estructural	C20/25
		Fino	20			
Netherlys NEN-5905	RCA	Rc+Ru>90	Grueso	20	Estructural	C55/67
Portugal LNEC - E471	RCA 1	Rc+Ru>90, Rb<10, Ra<5	Grueso	25	Estructural	C40/50
	MRA	Rc+Ru>70, Rb<30, Ra<5	Grueso	20		C35/45
Switzerly MB - 2030	RCA 1	Rc<25, Ru>75, Rb<5, Ra<1	Grueso	100	Estructural	Sin límite
	RCA 2	Rc>25, Ru<75, Rb<5, Ra<1		100		
	MRA	Rc+Ru< 95, Rb>5, Ra<1		100		
United Kingdom BS 8500-2	RCA	Rb< 5%, Ra<5	Grueso / Fino	20	Estructural	C40/50
France NF P 15-545	RCA 1	Rc+Ru>95, Rb<10, Ra<1	Grueso	60, 30, 20	Estructural	Sin límite
	RCA 2	Rc+Ru>90, Rb<10, Ra<10		40, 15		
	MRA	Rc+Ru>70, Rb<30, Ra<10		30, 5		
Spain EHE-08	RCA	Rb<5, Ra<1	Grueso	20	Estructural	C40/50
EN 206	RCA	Rc+Ru>95, Rb< 5, Ra<1	Grueso	50, 30	Estructural	Sin límite
	MRA	Rc+Ru>70, Rb< 30, Ra<5		50, 20		C30/37
<p><i>Nota. – RCA: recycled concrete aggregate; MRA: mixed recycled aggregate; HQ: high quality; MQ: medium quality; LQ: low quality; Rc: hormigón y mortero adherido; Ru: árido desligado; Rb: material cerámico; Ra: asfalto; y *Porcentaje de sustitución en función de la clase de exposición ambiental. A clase de exposición más agresiva menor porcentaje de sustitución</i></p>						

**Tabla 1.** (continuación)

<b>País</b>	<b>Tipo de árido</b>	<b>Composición</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Porcentaje máx. (%)</b>	<b>Tipo de hormigón</b>	<b>Clase resistente</b>
RILEM	RCA	R <sub>c</sub> <100	Grueso	100	Estructural	C50/60
Brazil NBR 15116	RCA	R <sub>c</sub> +R <sub>u</sub> >90	Grueso / Fino	100	No Estructural	-
	MRA	R <sub>c</sub> +R <sub>u</sub> <90				-

*Nota. – RCA: recycled concrete aggregate; MRA: mixed recycled aggregate; HQ: high quality; MQ: medium quality; LQ: low quality; Rc: hormigón y mortero adherido; Ru: árido desligado; Rb: material cerámico; Ra: asfalto; y \*Porcentaje de sustitución en función de la clase de exposición ambiental. A clase de exposición más agresiva menor porcentaje de sustitución*

Del análisis de la misma se observa como denominador común la limitación de la fracción gruesa de los RCA como sustitutos parciales del árido natural en un porcentaje entre un 15-60%, en función de la calidad del mismo, la resistencia de diseño del hormigón armado de carácter estructural y clase ambiental de exposición. Solamente, China, Australia, Japón, Dinamarca, Suiza y las recomendaciones RILEM permiten una sustitución total cuando los RCA son de alta calidad. Respecto al uso de arenas recicladas de RCA se encuentra solamente recogido el uso de arenas limpias procedentes del machaqueo de hormigón en la fabricación de hormigones estructurales en la normativa de China (100 – 30% del árido natural), Corea (30%), Japón (100%), Dinamarca (100%) y Reino Unido (20%). Asimismo, los RCA de peor calidad o que por su composición pueden considerarse MRA su uso está permitido en un 100% de sustitución para hormigones estructurales con una resistencia a compresión de diseño C25/30 (Australia) o bien limita su contenido máximo en un 20% (Portugal) y 35% (Alemania) para hormigones de clase resistente menor C30/37 y C35/45, respectivamente. En el resto de escenarios, solo es permitido el empleo de los mismos en el diseño de hormigones no estructurales. Teniendo en cuenta los estudios descritos, la mayoría de países limitan el uso de áridos reciclados, restringiéndolo al uso de la fracción gruesa de áridos procedentes del machaqueo de hormigón para porcentajes de sustitución pequeños (20-30%).

### **3 NECESIDAD Y VIABILIDAD DE LA UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS**

---

Con el fin de evaluar la viabilidad de incorporar este tipo de áridos en hormigón estructural, son muy numerosos los trabajos de investigación que han centrado su esfuerzo en evaluar las propiedades de los áridos gruesos reciclados procedentes del machaqueo de hormigón (RCA) y su efecto en las propiedades en estado fresco y endurecido, cuando son incorporados en distinto porcentaje (5-100%) formando parte del esqueleto granular de los nuevos hormigones reciclados. Dentro de ellos, destacan los trabajos realizados por Silva et al. [34] y Fonteboa et al. [35] que llevaron a cabo una recopilación bibliográfica de los resultados obtenidos previamente por la comunidad investigadora, extrayendo como principales conclusiones:

- i. El comportamiento mecánico, especialmente las resistencias a compresión y tracción, depende del contenido de árido reciclado, el método de fabricación del hormigón, el tipo de árido reciclado (árido reciclado de hormigón, árido reciclado mixto y árido reciclado cerámico), el tamaño y el origen del mismo
- ii. La resistencia a compresión no se ve afectada significativamente (descensos de un 10% respecto a los hormigones convencionales) para porcentajes de sustitución inferiores e iguales a un 30% y 20% de árido grueso y fino de hormigón reciclado, respectivamente

- iii. La resistencia a tracción se ve menos afectada que la resistencia a compresión, registrándose descensos entre un 5-15% y hasta un 35% respecto al hormigón convencional para un 50% de árido grueso o árido fino de hormigón, respectivamente.

Por otro lado, Jayasuriya [36] analizó estadísticamente una gran base de datos con resultados experimentales de hormigones que incluyen la fracción gruesa de áridos reciclados de hormigón, llegando a las siguientes conclusiones:

- i) El porcentaje óptimo de sustitución está por debajo del 20%, donde se obtienen las mejores propiedades en el hormigón.
- ii) Aunque se producen pérdidas de resistencia conforme aumenta el porcentaje de sustitución, el uso de áridos homogéneos (como en el caso de sustitución total) proporciona mejores resultados al tener toda la fracción las mismas propiedades.
- iii) La resistencia de los hormigones con áridos reciclados se ve afectada por un incremento de la relación agua/cemento efectiva
- iv) El comportamiento de fractura resulta impredecible debido a las notables diferencias de rigidez dentro de la matriz de hormigón, lo que hace necesario ampliar el estudio en este punto.

Complementando lo anterior, varios autores concluyen que el uso de áridos reciclados de hormigón es posible independientemente de la fracción y el porcentaje de sustitución si se consigue una calidad óptima del nuevo hormigón. Etxeberría [37] sostiene que el uso de árido grueso reciclado de hormigón es posible en hormigones de media-baja resistencia (20-45 MPa) incluso aunque se registraran variaciones de resistencia de hasta un 25% para sustitución total del árido grueso natural por árido de hormigón. La limitación de resistencia permite evitar un incremento en la cantidad de cemento dosificado, lo que resultaría contraproducente desde el punto de vista económico y ambiental. En la misma línea, McNeil [38] sostiene que, aunque existen diferencias de comportamiento, en estructuras reales se cumplen los requisitos especificados en las normas estructurales, lo que posibilita el uso de áridos reciclados en hormigón estructural aunque la calidad sea ligeramente inferior. Si además se sustituye la fracción fina por arena reciclada de hormigón, la reducción de resistencia suele ser mayor, ya que la fracción fina tiene más influencia en la resistencia que la fracción gruesa. Tang [39] analizó las propiedades del hormigón con un 100% de áridos reciclados, obteniendo pérdidas de hasta un 28.6% para sustitución total de ambas fracciones. Respecto a otras propiedades, el módulo elástico y la resistencia a tracción tienen un comportamiento similar, con pérdidas de entre un 20% y un 33% dependiendo de la cantidad de árido reciclado y la fracción elegida. En la misma línea, Kenai [40] obtiene descensos en todas las propiedades mecánicas del hormigón utilizando áridos reciclados hasta llegar a la sustitución total. El descenso de resistencia a compresión, de un 50% aproximadamente en el hormigón totalmente compuesto por áridos reciclados, presenta una

## Capítulo 1. Introducción

demanda de agua considerablemente mayor, debido fundamentalmente a la mayor absorción del árido reciclado. Este comportamiento se puede explicar analizando la microestructura del hormigón. Varios autores [41, 42] sostienen que la pérdida de prestaciones del hormigón con árido reciclado es debido a una ITZ de menor resistencia entre la capa de mortero adherida al árido reciclado y el mortero que se forma durante el amasado del hormigón. Las fisuras y poros presentes en esa capa de mortero viejo la convierten en el punto más débil del nuevo hormigón, que presenta además una mayor demanda de agua por el aumento de la absorción de esta capa de mortero [43].

La variabilidad de resultados anteriormente citada radica en la diferencia en la calidad de los áridos reciclados dependiendo del hormigón de origen. Kumar [44] observó que el uso de áridos procedentes de hormigones de resistencia media-baja (30 MPa) pero de alta calidad no afectaba la resistencia para porcentajes de sustitución de hasta un 20%. Por el contrario, sustituyendo las fracciones gruesa y fina, tanto por separado como conjuntamente, obtuvo resistencias ligeramente superiores con pequeños ajustes en la dosificación, obteniendo un hormigón de altas prestaciones (HPC). Asimismo, otros autores han obtenido hormigones reciclados más resistentes que las mezclas de referencia a largo plazo, utilizando la fracción gruesa hasta sustituir totalmente al árido natural [45], así como ambas fracciones, sustituyendo la fracción fina en porcentajes inferiores [46], definiendo el porcentaje óptimo por debajo del 60% [47].

Respecto a áridos no procedentes exclusivamente del machaqueo de hormigón, indicar que Silva et al. [34] observó que los descensos en la prestaciones mecánicas eran superiores cuando los áridos reciclados utilizados son áridos reciclados de albañilería (RMA), con mayor contenido cerámico, y áridos reciclados mixtos (MRA), observándose por ejemplo descensos de aproximadamente un 40% para porcentajes de sustitución de árido grueso mayor al 50%, siendo éstos mayores en el caso de los RMA. Sin embargo, en caso del empleo de áridos finos reciclados procedentes de RMA se observa un menor descenso debido a la actividad puzolánica de la fracción más fina ( $< 90 \mu\text{m}$ ), registrándose disminuciones entre un 10-30% respecto al hormigón convencional para una sustitución de un 100% de árido natural.

En este contexto, existe un consenso en la literatura en que la pérdida prestacional provocada por la incorporación de porcentajes de RCA menores de un 30% podría ser compensada con un incremento en el contenido de cemento en la dosificación de estos nuevos hormigones reciclados. Esta estrategia no es la más recomendada, ya que un mayor incremento de cemento provocaría un mayor coste/  $\text{m}^3$  de hormigón fabricado [48] y una mayor huella ambiental de los mismos, debido a que el cemento es el responsable del 85.6% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  de un hormigón [49]. Asimismo, Visintin et al. [50] reportaron que la incorporación adicional de cemento debido a un aumento del porcentaje de árido reciclado provoca un incremento entre 1.5-3 veces las emisiones de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  respecto a un hormigón convencional.

Este escenario, requiere la necesidad urgente por parte de la comunidad investigadora de profundizar en el conocimiento de la viabilidad de utilizar la fracción fina procedente de los RCD de forma independiente o simultánea con la fracción gruesa de RCA. De este modo se alcanzaría el ítem de valorizar esta fracción que representa entre un 25-50% del volumen de árido reciclado generado en su procesamiento en las plantas de gestión de RCD, que actualmente es desechado como subproducto y depositado en vertedero como residuo [51], y que juega un papel clave en el cierre de ciclo de vida de las estructuras de hormigón en el actual contexto de economía circular.

En cuanto a la viabilidad de introducir la fracción fina de los RCA ( $RFA_R$ ) como esqueleto granular en hormigones convencionales ha sido objeto de estudio de varios investigadores que reportan que la incorporación de ésta provoca un incremento de la demanda de agua y de superplastificante para mantener la misma trabajabilidad que cuando se usa arena natural de río, debido principalmente a la presencia de polvo y mortero adherido en su superficie [52]. Respecto a su efecto en las propiedades mecánicas no existe un consenso, registrándose que:

- i) Para porcentajes de hasta un 50% de sustitución la resistencia a compresión aumenta en un 13.7% [53], es similar al hormigón de referencia con aumentos de ~5% [54] o bien no provoca descensos significativos (<8%) [54, 55]
- ii) Para porcentajes de hasta un 70% [56] e incluso un 100% [51] este comportamiento no se ve afectado negativamente siendo la resistencia a tracción y compresión similar o superiores que en los hormigones convencionales
- iii) La incorporación de  $RFA_R$  provoca una pérdida gradual de la capacidad resistente [57], independientemente del porcentaje de sustitución, registrándose para un descensos máximos de ~5% y ~35% para porcentajes de un 25% y 100% de sustitución, respectivamente [58].

No obstante, se puede establecer a la luz de la literatura que para porcentajes de sustitución inferiores a un 30% las prestaciones de los nuevos hormigones se conservan e incluso mejoran [51, 59], no siendo tan dependientes los resultados obtenidos de la calidad y origen (trituration de hormigones a escala de laboratorio, procedentes de plantas o demolición in situ de estructura de hormigón) de las arenas finas recicladas.

En el caso de la fracción fina de los MRA ( $RFA_M$ ), el número de trabajos existentes es más reducido a nivel internacional estudio de la fracción fina es aún más reducido. Ahmed [60] registró que para sustituciones de hasta el 50% la resistencia a compresión no se ve afectada significativamente, experimentando un incremento de ~7% a los 28 días de curado. Por otro lado, Bravo [61] observó una pérdida prestacional a los 28 días de curado de ~7% y ~45% para porcentajes de sustitución de un 10% y 100% respectivamente. Adicionalmente, estos autores ponen de relieve que estos descensos incrementan con el porcentaje de incorporación y se ven

más afectados por su naturaleza y composición para porcentajes de incorporación de un 50%. En esta línea, Kirthika et al. [62] concluyen, al igual que otros autores para las  $RFA_R$  que el porcentaje de sustitución óptimo es el 30%, observándose para porcentajes mayores (50 – 100%) descensos máximos de un ~17%.

Por otro lado, los trabajos que incorporan simultáneamente las fracciones gruesa de hormigón y fina son escasos para la  $RFA_R$  e inexistentes en el caso de los  $RFA_M$ . En este marco, Sim and Park [63] evaluaron el comportamiento de los hormigones reciclados con un 100% de árido grueso de hormigón y un porcentaje de  $RFA_R$  entre 30%-100% observando que para porcentajes de mezcla de árido fino inferior al 60% se conseguían hormigones de resistencia a compresión mayores a 40 MPa y una pérdida prestacional máxima de un 14%. Wang et al. [51] reemplazaron de forma simultánea un 50% y 100% de árido grueso con un 50% y 100% de árido fino de hormigón, observándose un descenso máximo de ~10% de la resistencia a compresión en el caso de la mezcla con un 100% del esqueleto granular reciclado. En esta misma línea, Zhang et al. [56] analizaron el comportamiento de las mezclas con  $RFA_R$  (35% y 70%) y grueso RCA (35% y 70%), registrando que el porcentaje óptimo de sustitución era para la  $RFA_R$  de un 70% y de un 35% para el árido grueso obteniendo un incremento de la resistencia a compresión de ~26%. Asimismo, Berredjem et al. [64] reemplazó en un 100% el árido natural en todas sus fracciones, poniendo de relieve que el nuevo hormigón reciclado tenía una resistencia a compresión a los 28 días superior a 25 MPa y un descenso de la mismas de ~11% respecto al hormigón con árido natural. Por otro lado, Velay-Lizancos et al. [65] incorporaba la fracción 0/12 mm de árido reciclado de hormigón en un porcentaje entre 8%-31% obteniendo un descenso prestacional a los 28 días de ~30% respecto al hormigón con un 100% de árido natural. Adicionalmente, Lotfy and Al-Fayez [66] analizaron el efecto de incorporar un árido reciclado de hormigón de tamaño 0/20 mm en un 10% y 20% de sustitución del árido natural observando que estos nuevos hormigones tenían una resistencia superior a 35 MPa y no experimentaban un descenso significativo (< 3%) de su resistencia a compresión a los 28 días. Por último, Guo et al. sustituyeron la fracción gruesa (75% y 100%) de forma simultánea con  $RFA_R$  (30%, 60% y 100%) registrando descensos de la resistencia a compresión entre un 27% - 42%.

## **4 COHERENCIA E IMPORTANCIA UNITARIA DE LA TESIS DOCTORAL**

---

La presente Tesis Doctoral pretende profundizar en la aplicación de las normativas de gestión de residuos expuestas en el punto 2.1 de este capítulo, que buscan implantar un modelo de economía circular que permita el reciclaje y valorización de residuos de construcción y demolición (RCD) y/o subproductos industriales para reducir el consumo y agotamiento de las materias primas



tradicionales, reduciendo el impacto ambiental debido a la extracción y transporte de material virgen, así como del impacto derivado de desechar todos estos residuos en vertedero, como era habitual antes de la implantación de este modelo.

En este contexto, la presente Tesis Doctoral pretende ampliar el conocimiento sobre las líneas expuestas en el punto 3 de este capítulo donde, si bien se muestra que existen numerosos estudios sobre la utilización de la fracción gruesa de áridos procedentes del machaqueo de hormigón, no se ha encontrado un comportamiento similar en los estudios realizados en la sustitución de todas las fracciones del árido natural por árido reciclado. En este sentido, la presente investigación analiza la viabilidad de utilizar la totalidad del material resultante del procesamiento de residuos de construcción y demolición que se puedan clasificar como procedentes exclusivamente del machaqueo de hormigón (RCA).

Por otro lado, la práctica inexistencia de investigaciones donde se utilicen áridos de distinta naturaleza de manera conjunta en hormigón con fines estructurales justifica el análisis realizado en las mezclas que incluyen áridos procedentes de residuos mixtos. Concretamente, el uso de la fracción fina de este tipo de áridos reciclados se ha estudiado en menor medida debido a los problemas expuestos en el punto anterior acerca de las prestaciones de estos áridos y la variabilidad de sus propiedades en función del origen de los residuos. Es por esto que es necesario profundizar en este tipo de estudios acerca de la viabilidad de incorporar todo tipo de áridos procedentes de RCD, lo que contribuye a cerrar el ciclo de vida de las estructuras de hormigón o mixtas en el ámbito de una economía circular.

Para continuar, si bien existen estudios estadísticos sobre el uso de áridos reciclados en las prestaciones mecánicas del hormigón, no se han encontrado trabajos que analicen la combinación de materiales reciclados descrita anteriormente, por lo que es de vital importancia profundizar en el análisis de la evolución de las prestaciones mecánicas en hormigones que presentan diferente tipología y contenido de árido reciclado. La investigación incluida en la presente Tesis Doctoral contribuirá a ampliar el conocimiento sobre las proporciones de árido reciclado que pueden utilizarse sin afectar significativamente las prestaciones de estos nuevos hormigones. Asimismo, en caso de que se produzca una reducción de rendimiento, este estudio puede contribuir a encontrar porcentajes óptimos de sustitución de las distintas fracciones y tipologías de hormigón reciclado.

Para terminar, en el actual contexto de cambio climático y calentamiento global, es crucial la optimización en el consumo de energía en la fabricación, puesta en obra y posterior explotación de estructuras de hormigón, así como en la gestión una vez concluida su vida útil. La presente Tesis Doctoral analiza en términos de emisiones (mediante el Global Warming Potential - GWP) y de eficiencia en la resistencia cuáles de estas mezclas son susceptibles de ser utilizadas en

estructuras de hormigón que reduzcan su huella de carbono, reduciendo el impacto ambiental durante el ciclo de vida completo del material, desde la obtención de la materia prima hasta la gestión de residuos derivada de la demolición de la estructura, contribuyendo al modelo de economía circular que se desea implantar.

## 5 DESCRIPCIÓN DE LAS PUBLICACIONES

---

Se muestran a continuación las publicaciones en artículos científicos que componen esta Tesis Doctoral realizada por compendio de publicaciones, donde se incluyen los siguientes datos de cada publicación:

- i. Título
- ii. Autores
- iii. Revista
- iv. Factor de impacto mediante el indicador de calidad JCR
- v. Categoría y cuartil
- vi. Ideas principales (si las hubiere)
- vii. Resumen

### 5.1 REUTILIZACIÓN INTEGRAL DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS EN EL DISEÑO DE ECO-HORMIGONES ESTRUCTURALES. PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

- i. Título: Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO<sub>2</sub> emissions
- ii. Autores: **P. Plaza**, I.F. Sáez del Bosque, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas, C. Medina
- iii. Revista: Construction and Building Materials
- iv. Factor de impacto (JCR): 7.693 (año 2021)
- v. Categoría y cuartil: Construction & Building Technology (Q1); Engineering, Civil (Q1).
- vi. Ideas principales (highlights):
  - a. Hormigón estructural con áridos de hormigón y mixtos
  - b. Los áridos reciclados no afectan a la trabajabilidad del hormigón
  - c. Todos los hormigones pueden ser utilizados para la fabricación de hormigones de resistencia 30 MPa
  - d. Las expresiones propuestas por la EHE-08 para predecir resistencias a tracción y flexión deben ser corregidas
  - e. La incorporación de los áridos reciclados provoca un descenso de emisiones de CO<sub>2</sub>

vii. Resumen:

Este trabajo de investigación analiza el efecto de sustituir simultáneamente el árido grueso natural por árido reciclado de hormigón en distintos porcentajes (0% - 100%) y la fracción fina natural en un 50 % del árido fino reciclado de hormigón o mixto de RCD. Para ello se caracterizaron inicialmente estas nuevas materias primas secundarias, y posteriormente se analizó el efecto de su incorporación en las propiedades en estado fresco y endurecido de los nuevos eco-hormigones, así como su influencia en las correlaciones entre propiedades mecánicas recogidas en la normativa vigente y la propuesta de nuevas expresiones. Asimismo, se estudió las emisiones de CO<sub>2</sub> (GWP) de las nuevas formulaciones, evaluando la eco-eficiencia estructural definido como la ratio de la resistencia y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los resultados ponen de relieve que la incorporación de estos nuevos áridos provoca una pérdida máxima de resistencia tanto a compresión como a tracción, siendo estas inferiores al 17%. En el caso de la resistencia a flexión se obtienen pérdidas inferiores al 15%. Finalmente, los resultados muestran que el uso de los áridos reciclados de forma individual y/o simultánea reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> de los nuevos hormigones y la eco-eficiencia estructural.

## **5.2 ECO-HORMIGONES RECICLADOS FORMULADOS CON FRACCIÓN FINA Y/O GRUESA DE HORMIGÓN. COMPORTAMIENTO PRESTACIONAL**

- i. Título: Recycled eco-concretes containing fine and/or coarse concrete aggregates. Mechanical performance
- ii. Autores: **P. Plaza**, I.F. Sáez del Bosque, J. Sánchez, C. Medina.
- iii. Revista: Applied sciences
- iv. Factor de impacto (JCR): 2.7
- v. Categoría y cuartil: Engineering, Multidisciplinary (Q2)
- vi. Resumen:

Este estudio analizó el efecto de sustituir diferentes porcentajes de árido natural por árido reciclado procedente del machaqueo de hormigón, empleando tanto la fracción gruesa como la fracción fina. La caracterización de los materiales naturales y reciclados permitió analizar las prestaciones mecánicas y la impermeabilidad de estos eco-hormigones tanto en estado fresco como en estado endurecido. Asimismo, un análisis estadístico determinó si la pérdida de prestaciones era significativa desde un punto de vista estadístico, encontrando disminuciones de resistencia inferiores al 13% en la resistencia a compresión, así como pérdidas inferiores al 20% en la resistencia a flexión. Respecto a la impermeabilidad, se encontró una tendencia ascendente conforme aumentó el porcentaje de árido reciclado en la mezcla.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. European Commission, *Waste statistics*.
2. European Aggregates Association, *Annual review 2018-2019: A sustainability industry for a Sustainable Europe*. 2020: <http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-annual-review-2018-2019.pdf> [Fecha de consulta: 2020/03/09].
3. Medina, C., et al., *Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes*. Construction and Building Materials, 2015. **79**(0): p. 22-33.
4. Thomas, C., et al., *Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2018. **172**: p. 618-625.
5. Asensio, E., C. Medina, M. Frías, and M.I. Sánchez de Rojas, *Fired clay-based construction and demolition waste as pozzolanic addition in cements. Design of new eco-efficient cements*. Journal of Cleaner Production, 2020. **265**: p. 121610.
6. Medina, C., et al., *New additions for eco-efficient cement design. Impact on calorimetric behaviour and comparison of test methods*. Materials and Structures, 2016. **49**(11): p. 4595-4607.
7. Antony, J. and D.G. Nair, *Potential of Construction and Demolished Wastes as Pozzolana*. 1st Global Colloquium on Recent Advancements and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology - Raerest 2016, 2016. **25**: p. 194-200.
8. Rocha, S. and J. Sousa-Coutinho, *Construction and demolition waste as partial cement replacement*. Advances in Cement Research, 2019. **31**(9): p. 411-422.
9. Akhtar, A. and A.K. Sarmah, *Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective*. Journal of Cleaner Production, 2018. **186**: p. 262-281.
10. Alnahhal, M.F., et al., *Assessment on engineering properties and CO2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement*. Journal of Cleaner Production, 2018. **203**: p. 822-835.
11. Üрге-Vorsatz, D. and A. Novikova, *Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings*. Energy Policy, 2008. **36**(2): p. 642-661.
12. Peng, C., *Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling*. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 453-465.
13. Zhang, Z. and B. Wang, *Research on the life-cycle CO2 emission of China's construction sector*. Energy and Buildings, 2016. **112**: p. 244-255.

14. Zhao, M.-Z., et al., *Response and modeling of axially-loaded concrete-filled steel columns with recycled coarse and fine aggregate*. Engineering Structures, 2021. **234**: p. 111733.
15. Katerusha, D., *Investigation of the optimal price for recycled aggregate concrete — an experimental approach*. Journal of Cleaner Production, 2022. **365**: p. 132857.
16. Almourdin, N., et al., *Effect of fine and coarse recycled aggregates on high-temperature behaviour and residual properties of concrete*. Construction and Building Materials, 2022. **341**: p. 127847.
17. Wang, B., L. Yan, Q. Fu, and B. Kasal, *A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 2021. **171**: p. 105565.
18. Group, F., *Global Construction Aggregates—Demand and Sales Forecasts, Market Share, Market Size, Market Leaders*. 2016, Freedonia Group Cleveland, OH, USA.
19. Da, S. and P. Le Billon, *Sand mining: Stopping the grind of unregulated supply chains*. The Extractive Industries and Society, 2022. **10**: p. 101070.
20. Comission, E., *EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*. 2010.
21. Comission, E., *The Paris Protocol - A blueprint for tackling global climate change beyond 2020*. 2015.
22. Comission, E., *Next steps for a sustainable European future. European action for sustainability*. 2016.
23. Europea, C., *Comunicación (2014) 398 final. Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa*. 2014, Comisión Europea.
24. Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*. 2018, Diario Oficial de la Unión Europea. p. 31.
25. Ministerio para la Transición Económica y el Reto Demográfico, *Versión inicial del Plan Estatal Marco de Residuos (PEMAR) 2023-2035*. 2023: BOE. p. 238.
26. Consejería para la Transición Ecológica y Sostenibilidad, *Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2023-2030*. 2023, Junta de Extremadura. p. 237.
27. Europea, C., *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por el que se derogan ciertas normativas*. 2008: Diario Oficial de la Unión Europea. p. 28.
28. Ambiente, M.d.A.A.y.M., *Plan Estatal Marco Gestión de Residuos 2016-2022 (PEMAR)*. 2016. p. 192.

29. Jefatura del Estado, *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*. 2022: BOE. p. 136.
30. Estado, J.d., *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*. 2011. p. 56.
31. Extremadura, J.d., *Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2016-2022*. 2016. p. 143.
32. de Brito, J., F. Agrela, and R.V. Silva, *18 - Legal regulations of recycled aggregate concrete in buildings and roads*, in *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, J. de Brito and F. Agrela, Editors. 2019, Woodhead Publishing. p. 509-526.
33. Tam, V.W., M. Soomro, and A.C.J. Evangelista, *A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)*. *Construction and Building Materials*, 2018. **172**: p. 272-292.
34. Silva, R.V., J. de Brito, and R.K. Dhir, *The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015. **19**(7): p. 825-849.
35. Gonzalez-Fontebao, B., et al., *Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis*. *Materiales De Construccion*, 2018. **68**(330).
36. Jayasuriya, A., E.S. Shibata, T. Chen, and M.P. Adams, *Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregates*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. **164**: p. 105121.
37. Etxeberria, M., E. Vazquez, A. Mari, and M. Barra, *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. *Cement and Concrete Research*, 2007. **37**(5): p. 735-742.
38. McNeil, K. and T.H.K. Kang, *Recycled Concrete Aggregates: A Review*. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2013. **7**(1): p. 61-69.
39. Tang, Y., et al., *Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, 2022. **323**: p. 126546.
40. Kenai, S., F. Debieb, and L. Azzouz, *MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF CONCRETE MADE WITH COARSE AND FINE RECYCLED CONCRETE AGGREGATES*, in *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction*. p. 383-392.
41. Zheng, Y., Y. Zhang, and P. Zhang, *Methods for improving the durability of recycled aggregate concrete: A review*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021. **15**: p. 6367-6386.
42. Liang, C., et al., *Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregate concrete: A review*. *Construction and Building Materials*, 2021. **282**: p. 122547.

43. Poon, C.S., et al., *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete*. Cement and Concrete Research, 2004. **34**(1): p. 31-36.
44. Vinay Kumar, B.M., H. Ananthan, and K.V.A. Balaji, *Experimental studies on utilization of recycled coarse and fine aggregates in high performance concrete mixes*. Alexandria Engineering Journal, 2018. **57**(3): p. 1749-1759.
45. Kou, S.-C., C.-S. Poon, and M. Etxeberria, *Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete*. Cement and Concrete Composites, 2011. **33**(2): p. 286-291.
46. Singh, R., et al., *Effects of recycled fine aggregates on properties of concrete containing natural or recycled coarse aggregates: A comparative study*. Journal of Building Engineering, 2022. **45**: p. 103442.
47. Kaarthik, M. and D. Maruthachalam, *A sustainable approach of characteristic strength of concrete using recycled fine aggregate*. Materials Today: Proceedings, 2021. **45**: p. 6377-6380.
48. Braga, A.M., J.D. Silvestre, and J. de Brito, *Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates*. Journal of Cleaner Production, 2017. **162**: p. 529-543.
49. Jiménez, L.F., J.A. Domínguez, and R.E. Vega-Azamar, *Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete*. Advances in Civil Engineering, 2018. **2018**: p. 7949741.
50. Visintin, P., T. Xie, and B. Bennett, *A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake*. Journal of Cleaner Production, 2020. **248**: p. 119243.
51. Wang, Y., et al., *Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate*. Construction and Building Materials, 2019. **215**: p. 332-346.
52. Kirthika, S.K., S.K. Singh, and A. Chourasia, *Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review*. Journal of Cleaner Production, 2020: p. 122089.
53. Salahuddin, H., L.A. Qureshi, A. Nawaz, and S.S. Raza, *Effect of recycled fine aggregates on performance of Reactive Powder Concrete*. Construction and Building Materials, 2020. **243**: p. 118223.
54. Puente de Andrade, G., G. de Castro Polisseni, M. Pepe, and R.D. Toledo Filho, *Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model*. Construction and Building Materials, 2020. **252**: p. 119091.
55. Kumar, R., S.C.B. Gurram, and A.K. Minocha, *Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete*. Magazine of Concrete Research, 2017. **69**(24): p. 1288-1295.

56. Zhang, L.W., A.O. Sojobi, V.K.R. Kodur, and K.M. Liew, *Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment*. Journal of Cleaner Production, 2019. **236**: p. 117600.
57. Guo, Z., et al., *Mechanical and durability behaviours of concrete made with recycled coarse and fine aggregates*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020. **24**(2): p. 171-189.
58. Fan, C.-C., R. Huang, H. Hwang, and S.-J. Chao, *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes*. Construction and Building Materials, 2016. **112**: p. 708-715.
59. Evangelista, L. and J. de Brito, *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(5): p. 397-401.
60. Ahmed, S., *Properties of concrete containing recycled fine aggregate and fly ash*. The Journal of Solid Waste Technology and Management, 2014. **40**(1): p. 70-78.
61. Bravo, M., J. de Brito, J. Pontes, and L. Evangelista, *Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants*. Journal of Cleaner Production, 2015. **99**: p. 59-74.
62. Kirthika, S.K., S.K. Singh, and A. Chourasia, *Performance of Recycled Fine-Aggregate Concrete Using Novel Mix-Proportioning Method*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020. **32**(8): p. 04020216.
63. Sim, J. and C. Park, *Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate*. Waste Management, 2011. **31**(11): p. 2352-2360.
64. Berredjem, L., N. Arabi, and L. Molez, *Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete*. Construction and Building Materials, 2020. **246**: p. 118421.
65. Velay-Lizancos, M., et al., *Concrete with fine and coarse recycled aggregates: E-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages*. Construction and Building Materials, 2018. **193**: p. 323-331.
66. Lotfy, A. and M. Al-Fayez, *Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate*. Cement and concrete composites, 2015. **61**: p. 36-43.



# Capítulo 2. Objetivos

En este capítulo se definen los objetivos de la Tesis Doctoral “Diseño de eco-hormigones basados en la valorización de residuos. Nivel prestacional y durable”, que se dividen en un objetivo general y varios objetivos específicos que han llevado a alcanzarlo.

## **1 OBJETIVO GENERAL DE LA TESIS DOCTORAL:**

---

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es estudiar desde el punto de vista estadístico el comportamiento mecánico y durable de hormigones que incluyen en su composición áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), tanto procedentes exclusivamente del machaqueo de hormigón como de residuos mixtos, así como su viabilidad para ser utilizados en aplicaciones estructurales.

Para alcanzar este objetivo general se han desarrollado los siguientes objetivos específicos.

## **2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA TESIS DOCTORAL**

---

Los objetivos específicos que se han desarrollado en esta Tesis Doctoral se han dividido en los siguientes bloques:

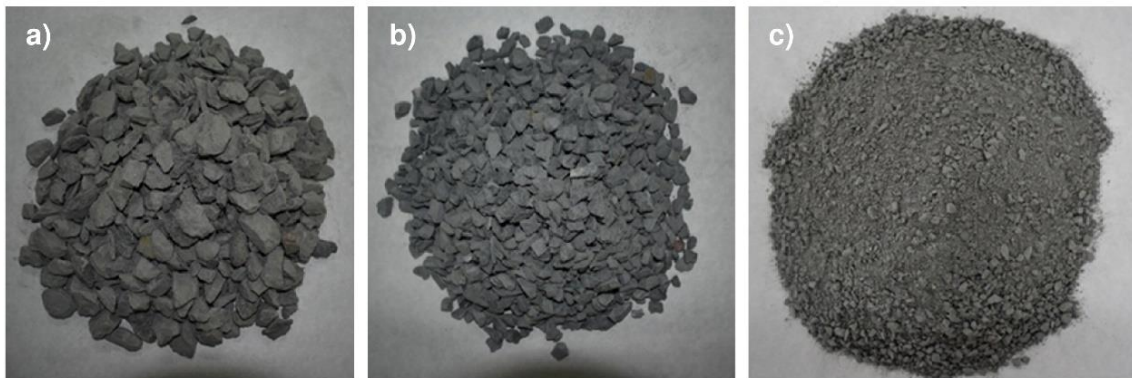
- i. Análisis del efecto de la sustitución total o parcial de áridos naturales por áridos reciclados procedentes de RCD, tanto de hormigón como mixtos, en todas las fracciones, gruesa y fina.
- ii. Caracterización geométrica, física, mecánica y química de los RCD
- iii. Diseño y fabricación de hormigones
- iv. Análisis de las propiedades de los hormigones que contienen áridos procedentes de RCD
  1. Análisis de propiedades en estado fresco (consistencia, aire ocluido, densidad)
  2. Análisis de propiedades en estado endurecido (densidad aparente, resistencias a compresión, tracción y flexión, impermeabilidad)
- v. Análisis estadístico de la influencia de los RCD en las propiedades estudiadas en el punto anterior, estableciendo diferentes modelos en función de la propiedad analizada.
- vi. Análisis del impacto ambiental de los hormigones que contienen RCD.

## Capítulo 2. Objetivos

# Capítulo 3. Metodología

## 1 MATERIALES

El árido natural es un árido de machaqueo de una grauvaca con morfología irregular y aristas marcadas (Figura 4) que ha sido suministrado en tres fracciones granulométricas 0/6, 6/12 y 12/20 mm correspondiente a arena natural (AN), gravilla natural (gN) y grava natural (GN), respectivamente. En cuanto a su composición química presenta una naturaleza silíceo, con un contenido de  $\text{SiO}_2$  de en torno a un 60% y otros óxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ ) en un menor porcentaje. Desde el punto de vista mineralógico está constituido por cuarzo, así como feldespatos y filosilicatos.

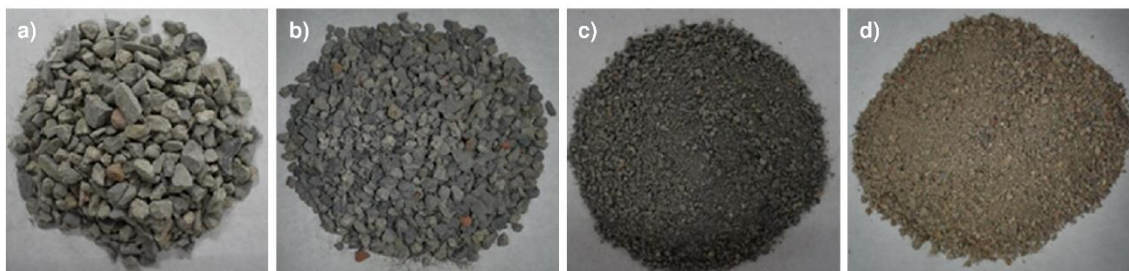


**Figura 4.** a) Grava natural (GN); b) Gravilla natural (gN); y c) Arena natural (AN)

Los áridos reciclados gruesos y finos (Figura 5) han sido suministrados por ARAPLASA residuos, planta de gestión de RCD situada en Plasencia, localidad ubicada en el norte de la provincia de Cáceres (España). Las fracciones gruesas (grava - GH y gravilla - gH) suministradas (12/22 mm y 6/12 mm) proceden exclusivamente del machaqueo de hormigón, mientras que la fracción fina (0/6 mm) es de dos tipologías:

- i. Árido fino procedente del machaqueo de hormigón (AH) y que representa la fracción fina resultante del proceso de obtención de las fracciones gruesas recicladas utilizadas en la presente investigación (GH y gH)
- ii. Árido fino procedente de residuos mixtos (AM) que contienen ~85% de restos de hormigón, mortero adherido y árido desligado, y ~15% de material cerámico.

En cuanto a su morfología, se observa que tienen formas irregulares mostrando partículas de formas más redondeadas y otras con formas aciculares o de laja, predominando las primeras. Asimismo, la arena mixta muestra un color rojizo, asociado a la presencia de partículas cerámicas.



**Figura 5.** Grava reciclada de hormigón (GH); b) Gravilla reciclada de hormigón (gH); c) Arena de hormigón (AH); y d) Arena mixta (AM).

El cemento utilizado es un cemento portland CEM I 42.5 R suministrado por una planta de cemento del grupo Lafarge Holcim situada en Villaluenga de la Sagra (Toledo – España). Este cemento cumple los requisitos establecidos en la norma EN 197-1 [1].

Por último, el aditivo utilizado ha consistido en un reductor de agua de alta actividad consistente en un policarboxilato modificado en base acuosa (FUCHS BRYTEN NF) suministrado por FUCHS Lubricantes S.A.U. Este aditivo de color marrón tiene un contenido de sólidos de un 20%, una densidad de  $1.1 \text{ g/cm}^3$  y un pH de 8.0.

## 2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS

La Tabla 2 recoge las mezclas diseñadas en la presente investigación. En la misma, se observa que se han estudiado un total de 25 mezclas diferentes: 1 mezcla de referencia con un 100% de árido natural (HP); 4 mezclas con árido grueso reciclado en un porcentaje igual al 25% (HR-25), 50% (HR-50), 75% (HR-75) y 100% (HR-100); 3 mezclas con árido grueso natural y un 10% (HR-0+10), 20% (HR-0+20) y 50% (HR-0+50) de arena reciclada de hormigón, 12 mezclas con árido grueso reciclado en distinto porcentaje (25%, 50%, 75% y 100%) y un 10% (HR-25+10, HR-50+10, HR-75+10 y HR-100+10), 20% (HR-25+20, HR-50+20, HR-75+20 y HR-100+20) y 50% (HR-25+50, HR-50+50, HR-75+50 y HR-100+50) de arena reciclada de hormigón; 1 mezcla con árido grueso natural y un 50% de arena reciclada mixta (HR-0+50M); y 4 mezclas con árido grueso reciclado en distinto porcentaje (25%, 50%, 75% y 100%) y un 50% de arena reciclada de hormigón (HR-25+50M, HR-50+50M, HR-75+50M y HR-100+50M).

Para llevar a cabo el diseño y formulación de las mezclas ha sido utilizado el DOE British Method [2], tomando como datos de partida una resistencia característica de diseño ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa (C30/37), un tamaño máximo del árido igual a 20 mm y una relación agua cemento (a/c) efectiva constante de 0.45. Asimismo, en este proceso de dosificación se ha considerado los áridos secos y el 70% de la absorción de agua de los áridos reciclados, garantizando de este modo que todas las mezclas independientemente de su esqueleto granular tengan la misma agua disponible para

la hidratación del cemento. Adicionalmente, para conseguir una trabajabilidad adecuada con esta relación a/c se ha añadido una cantidad de aditivo de 6.20 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 2.** Dosificación

Mezcla	Componentes (kg/m <sup>3</sup> )							
	AN	AH/AM	gN	GN	gH	GH	Cemento	Agua
<b>HP</b>	732.36	0.00	382.96	766.69	0.00	0.00	400.00	193.03
<b>HR-0+10</b>	655.65	70.59	380.95	762.65	0.00	0.00	400.00	195.20
<b>HR-0+20</b>	581.26	140.81	379.94	760.63	0.00	0.00	400.00	197.40
<b>HR-0+50</b>	360.4	349.21	376.92	754.58	0.00	0.00	400.00	203.93
<b>HR-25</b>	724.65	0.00	284.20	568.96	92.01	186.72	400.00	197.37
<b>HR-25+10</b>	648.72	109.24	282.69	565.94	91.52	185.72	400.00	202.36
<b>HR-25+20</b>	576.64	218.48	282.69	565.94	91.52	185.72	400.00	206.34
<b>HR-25+50</b>	358.47	347.35	281.18	562.91	184.73	281.18	400.00	209.38
<b>HR-50</b>	716.94	0.00	187.45	375.27	182.06	369.46	400.00	203.86
<b>HR-50+10</b>	643.51	108.37	186.95	374.26	181.57	368.47	400.00	207.72
<b>HR-50+20</b>	572.01	216.73	186.95	374.26	181.57	368.47	400.00	211.67
<b>HR-50+50</b>	354.62	343.61	185.43	371.24	180.10	365.49	400.00	214.55
<b>HR-75</b>	711.16	0.00	92.97	186.12	270.88	549.72	400.00	209.18
<b>HR-75+10</b>	638.31	68.72	92.72	185.62	270.15	548.23	400.00	211.29
<b>HR-75+20</b>	567.38	137.44	92.72	185.62	270.15	548.23	400.00	213.49
<b>HR-75+50</b>	349.80	338.94	91.46	183.10	266.48	540.79	400.00	219.48
<b>HR-100</b>	701.52	0.00	0.00	0.00	356.29	723.03	400.00	214.20
<b>HR-100+10</b>	627.90	67.60	0.00	0.00	356.29	723.03	400.00	216.15
<b>HR-100+20</b>	556.59	134.83	0.00	0.00	353.35	717.07	400.00	218.19
<b>HR-100+50</b>	345.94	335.21	0.00	0.00	351.39	713.10	400.00	224.40
<b>HR-0+50M</b>	358.47	344.15	374.90	750.55	0.00	0.00	400.00	206.97
<b>HR-25+50M</b>	355.58	341.37	278.91	558.37	90.29	183.24	400.00	212.27
<b>HR-50+50M</b>	353.65	339.52	184.93	370.23	179.61	364.50	400.00	217.60
<b>HR-75+50M</b>	346.91	333.05	90.70	181.58	264.28	536.32	400.00	222.21
<b>HR-100+50M</b>	344.02	330.27	0.00	0.00	349.43	709.13	400.00	227.19

Finalmente, todas las mezclas cumplen los requisitos mínimos de dosificación (máxima relación agua/cemento y contenido mínimo de cemento) recogidos en el artículo 43.2.1 del CodE [3] para su uso como hormigón estructural para clases de exposición XC1/XC2 y XC3/XC4 con relación agua cemento máxima de 0.60 y 0.55, respectivamente. En cuanto al contenido mínimo de cemento se establece un valor de 275 kg/m<sup>3</sup> y 300 kg/m<sup>3</sup> de cemento para las clases XC1/XC2 y XC3/XC4, respectivamente.

La Figura 6 muestra el procedimiento seguido para el amasado de las mezclas diseñadas, fabricación y posterior curado de las probetas. La primera fase del proceso de amasado consiste en la carga y homogeneización de los materiales. Para ellos se introdujeron primeramente el esqueleto granular constituido por los áridos en la amasadora, que se mezclan en la amasadora durante 30 segundos. Acto seguido se añade el cemento, mezclando durante otros 60 segundos. La segunda fase consiste en el amasado propiamente dicho, que comienza diluyendo el aditivo en el 10% del agua de amasado. Esta mezcla se añade a la amasadora durante 45 segundos, tras los cuales se añade el 70% del agua de amasado. Por último, se añade el 20% restante y se mezcla todo durante 240 segundos. Finalmente, la tercera fase consiste en el llenado de los moldes y su compactación mediante picado con barra tal y como establece la norma EN 12390-1 [4].

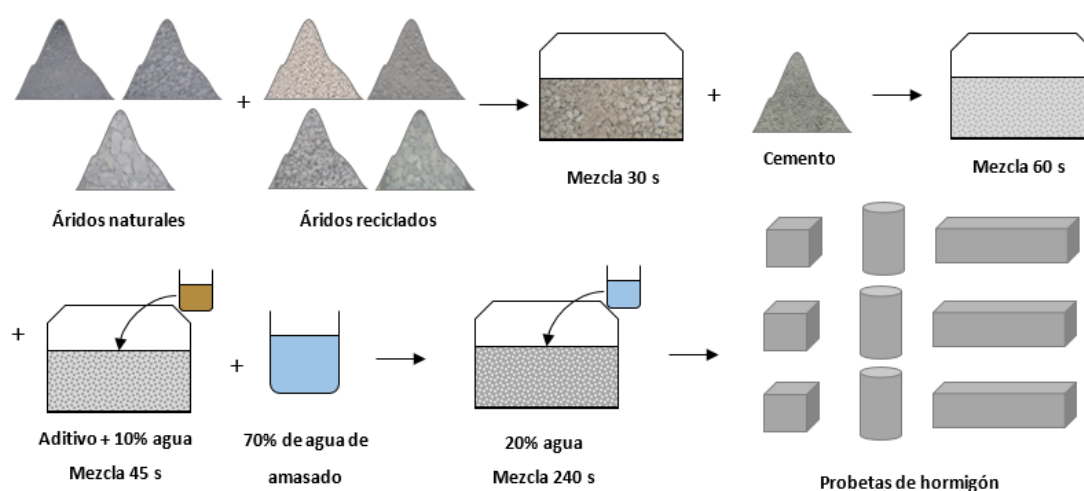


Figura 6. Diagrama de fabricación de los hormigones.

### 3 PROPIEDADES ESTUDIADAS

Previamente a la formulación de las mezclas se llevó a cabo la caracterización de los áridos mediante el estudio su composición y de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, con el fin de comprobar los requisitos recogidos en la norma EN 12620 [5], para áridos utilizados en la fabricación de hormigón, y obtener los parámetros necesarios para el diseño de las mezclas. Los ensayos realizados y la norma de referencia correspondiente se muestran en la Tabla 3.

Respecto al estudio de las mezclas diseñadas, se realizó la caracterización de los hormigones en estado fresco y endurecido mediante la determinación de las propiedades recogidas en la Tabla 4. Para el estudio de estas propiedades se han fabricado para cada mezcla, edad y ensayo un total de 3 probetas que fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas mediante inmersión en agua hasta la edad de ensayo.

**Tabla 3.** Propiedades estudiadas en los áridos

Ensayo	Norma
Granulometría	EN 933-1 [6]
Tamaño máximo (D) Tamaño mínimo (d)	EN 933-2 [7]
Forma (índice de lajas)	EN 933-3 [8]
Equivalente de arena	EN 933-8 [9]
Clasificación de componentes	EN 933-11 [10]
Densidad	EN 1097-6 [11]
Absorción de agua	
Coefficiente de Los Ángeles	EN 1097-2 [12]
Contenido de materia orgánica	EN 1744-1 [13]
Contenido de cloruros solubles en agua	
Contenido de sulfatos solubles en ácido y compuestos totales de azufre	

**Tabla 4.** Propiedades estudiadas en los hormigones

Propiedad	Norma	Tamaño probeta (cm)	NP/M	Edad de ensayo (días)
<i>Estado fresco</i>				
Densidad	EN 12350-6 [14]	Evaluadas durante el proceso de fabricación		
Aire ocluido	EN 12350-7 [15]			
Consistencia	EN 12350-2 [16]			
<i>Estado endurecido</i>				
Densidad	EN 12390-7 [17]	15x15x15	3	28
Resistencia a compresión	EN 12390-3 [18]	15x15x15	9	7, 28, 90
Resistencia a tracción indirecta	EN 12390-6 [19]	Ø10x20	3	28
Resistencia a flexión	EN 12390-5 [20]	10x10x40	3	28
Penetración de agua bajo presión	EN 12390-8 [21]	Ø15x30	3	28
<i>Nota:</i> NP/M: nº de probetas/mezcla				

Adicionalmente, se estudió el efecto de la incorporación individual de árido grueso reciclado de hormigón o de forma simultánea con arena reciclada de hormigón o mixta en la microestructura

del sistema poroso (porosidad total y distribución de tamaño de partícula) en los nuevos hormigones. Este efecto fue evaluado con un porosímetro de mercurio Micromeritics Autopore IV 9500, operando a presiones de hasta 33000 psi (227.5 MPa) para medir diámetros de poro de 0.006  $\mu\text{m}$ -175  $\mu\text{m}$  siguiendo la norma ASTM D 4404 [22]. Asimismo, indicar que las características del sistema poroso no fueron evaluadas en todas las mezclas de hormigón, eligiéndose para ello el HP, los hormigones con un menor porcentaje de árido grueso de hormigón y/o con arena reciclada (HR-25, HR-25+50 y HR-25+50M) y hormigones con un porcentaje intermedio (HR-75, HR-75+50 y HR-75+50M).

## 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

---

Para evaluar si la sustitución del árido natural por árido reciclado influye de forma directa en las propiedades mecánicas de los hormigones se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA) para cada tipo de árido fino, edad y propiedad estudiada, realizando un total de 15 análisis, utilizando el software estadístico libre “R”, en un entorno de computación estadística y producción de gráficos, en su versión 3.6.1.

El modelo propuesto (Eq. 1) se corresponde a un modelo con dos factores (% de árido grueso reciclado y % de árido fino reciclado) e interacción.

$$Y_{ijk} = \mu_{11} + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad i=1, \dots, 4; \quad j=2, \dots, 4; \quad k=1, \dots, 3 \quad (\text{Eq. (1)})$$

Este modelo obtiene la variable respuesta ( $Y_{ijk}$ ), que se corresponde con la resistencia obtenida para cada combinación, sumando una serie de factores, donde:

- i.  $\mu_{11}$  es el valor medio de la resistencia estudiada en cada caso para el hormigón de referencia (HP)
- ii.  $\alpha_i$  es el efecto relativo medio que se produce al incorporar un porcentaje de sustitución del árido grueso (25%, 50%, 75% y 100%)
- iii.  $\beta_j$  es el efecto relativo medio que se produce al incorporar el árido fino reciclado (50%)
- iv.  $\alpha\beta_{ij}$  es el efecto relativo medio debido a la interacción de los dos factores (árido grueso reciclado y árido fino reciclado)
- v.  $\varepsilon_{ijk}$  son las perturbaciones del modelo.

En este análisis estadístico, además de calcular el valor de los coeficientes del modelo, se indica cuáles de esos valores son significativos, es decir, para qué porcentajes de sustitución se produce un aumento o descenso de resistencia que desde el punto de vista estadístico (p-valor  $<0.05$ ) debe ser tenido en cuenta a nivel de cálculo.

Respecto a los análisis realizados, se han dividido las mezclas en 2 grupos. En primer lugar, se han realizado 10 análisis incluyendo la mezcla de referencia (HP), las mezclas que solo sustituyen



la fracción gruesa (HR-25, HR-50, HR-75 y HR-100) y las mezclas que sustituyen un 50% del árido fino por árido reciclado, tanto de hormigón como mixtas. En este primer caso se han analizado las propiedades mecánicas (resistencias a compresión, tracción y flexión), realizando un análisis para cada propiedad y edad estudiada. Por tanto, se han realizado 6 análisis para la resistencia a compresión (2 tipos de árido y 3 edades diferentes) y 2 análisis para las resistencias a tracción indirecta y flexión (2 tipos de árido y 1 edad).

En segundo lugar, se han realizado 5 análisis incluyendo solo la mezcla de referencia (HP) y las mezclas que sustituyen alguna de sus fracciones por árido de hormigón. Se incluyen en este punto las mezclas que contienen un 10% y un 20% de arena de hormigón, las cuales no se habían incluido anteriormente, y se excluyen las mezclas que contienen árido mixto. En este caso, se han analizado las resistencias a compresión y flexión y la impermeabilidad, con 3 análisis en la resistencia a compresión (3 edades) y un análisis para el resto de propiedades (1 edad).

Esta división en el análisis se realiza para que los efectos relativos del árido fino sean iguales en todos los análisis, contando en el primer grupo con 3 tipos diferentes de arenas pero en la misma proporción y contando en el segundo grupo con 4 porcentajes diferentes de sustitución de una misma arena (AH).

La Tabla 5 muestra los p-valores de las comprobaciones de homocedasticidad y normalidad a través de los contrastes de Bartlett y Shapiro-Wilk de los resultados obtenidos en las prestaciones mecánicas (compresión, tracción y flexión) de los hormigones estudiados. Asimismo, la Tabla 6 muestra los p-valores de los 5 análisis restantes. En la misma, se puede apreciar que en todos los análisis el p-valor es superior a 0.05, por lo que se considera que no existe evidencia estadística de que se incumplan las suposiciones iniciales pudiendo realizar de este modo el análisis de varianza (ANOVA).

**Tabla 5.** Comprobaciones de homocedasticidad y normalidad del primer grupo de análisis.

Tipo de contraste	Propiedad mecánica									
	Compresión						Tracción		Flexión	
	AN-AH 7d	AN-AM 7d	AN-AH 28d	AN-AM 28d	AN-AH 90d	AN-AM 90d	AN-AH 28d	AN-AM 28d	AN-AH 28d	AN-AM 28d
Bartlett	0.639	0.329	0.485	0.256	0.673	0.553	0.749	0.420	0.932	0.434
Shapiro-Wilk	0.448	0.811	0.187	0.082	0.603	0.437	0.467	0.149	0.968	0.654
<p><i>Nota.</i> – AN-AH: mezclas árido natural – mezclas con árido reciclado de hormigón; y AN-AM: mezclas árido natural – mezclas con arena reciclada mixta</p>										

**Tabla 6.** Comprobaciones de homocedasticidad y normalidad del segundo grupo de análisis.

Tipo de contraste	Compresión			Flexión	Agua bajo presión
	7 días	28 días	90 días		
Bartlett	0.456	0.803	0.381	0.605	0.075
Shapiro-Wilk	0.237	0.627	0.556	0.231	0.532

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. European Committee for Standardization, *EN 197-1:2001. Cement, Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. 2001. p. 40.
2. Teychenné, D.C., R.E. Franklin, and H.C. Erntroy, *Design of normal concrete mixes*. 2010, IHS BRE Press: Garston, Watford.
3. Ministry of Transport Mobility and Urban Agenda, *Structural Code*. 2021: Madrid. p. 1789.
4. European Committee for Standardization, *EN 12390-1. Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*. 2022. p. 16.
5. European Committee for Standardization, *EN 12620:2002+A1:2008. Aggregates for concrete*. 2008. p. 60.
6. Standardization, E.C.f., *EN 933-1:2012. Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method*. 2012. p. 20.
7. Standardization, E.C.f., *EN 933-2:1995/1M:1999. Test for geometrical properties of aggregates. Part 2: Determination of particle size distribution. Test sieves, nominal size of apertures*. 1999. p. 10.
8. Standardization, E.C.f., *EN 933-3:2012. Test for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape. Flakiness index*. 2012. p. 14.
9. Standardization, E.C.f., *EN 933-8:2011+A1:2015/1M:2016. Test for geometrical properties of aggregates. Part 8: Assessment of fines. Sand equivalent test*. 2016. p. 26.
10. Standardization, E.C.f., *EN 933-11:2009/AC:2009. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*. 2009. p. 18.
11. Standardization, E.C.f., *EN 1097-6:2014. Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption*. 2014. p. 54.

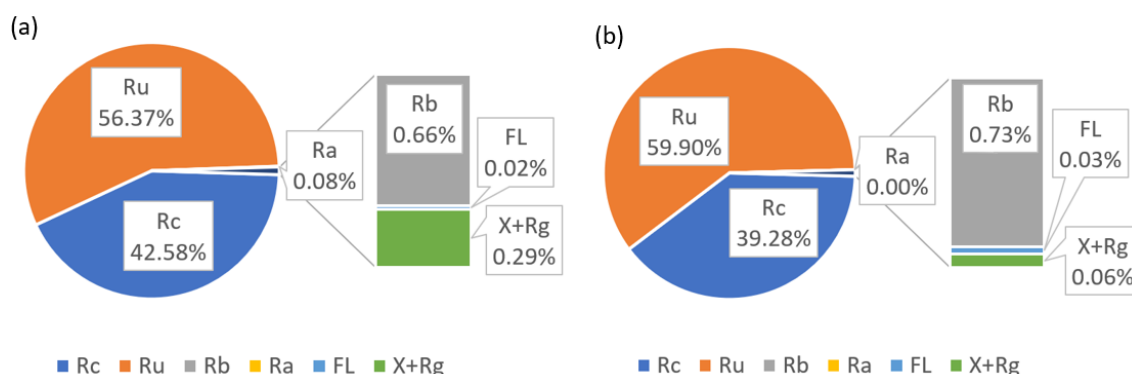
12. Standardization, E.C.f., *EN 1097-2:2021. Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.* 2021. p. 50.
13. Standardization, E.C.f., *EN 1744-1:2010+A1:2013. Tests for chemical properties of aggregates. Part 1: Chemical analysis.* 2013. p. 64.
14. European Committee for Standardization, *EN 12350-6:2020. Testing fresh concrete. Part 6: Density.* 2020. p. 15.
15. European Committee for Standardization, *EN 12350-7:2020+AC:2022. Testing fresh concrete. Part 7: Air content. Pressure methods.* 2022. p. 33.
16. European Committee for Standardization, *EN 12350-2:2020. Testing fresh concrete. Part 2: slump test.* 2020: Brussels. p. 13.
17. European Committee for Standardization, *EN 12390-7:2020/AC:2020. Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete.* 2020. p. 19.
18. European Committee for Standardization, *EN 12390-3:2020. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.* 2020. p. 24.
19. Standardization, E.C.f., *EN 12390-6:2009. Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.* 2009. p. 14.
20. European Committee for Standardization, *EN 12390-5:2020. Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens.* 2020. p. 14.
21. European Committee for Standardization, *EN 12390-8:2009/1M:2011. Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure.* 2011. p. 16.
22. American Society for Testing and Materials, *D 4404-84: Test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry.* 2004, ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D4404-10, [www.astm.org](http://www.astm.org).



# Capítulo 4. Resultados

## 1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS

La Figura 7 muestra los resultados de la clasificación composicional de la fracción gruesa de los áridos reciclados, donde se puede observar que el contenido de hormigón y áridos desligados (Rc+Ru) es superior al 95%, tratándose de un árido reciclado de hormigón tipo A, según las especificaciones de la norma EN 206 [1].



**Figura 7.** Resultados de clasificación composicional para: (a) gH y (b) GH.

En cuanto a las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los áridos empleados, estas se muestran en la Tabla 7, así como los límites establecidos en la norma EN 12620 [2] para cada una de estas propiedades.

En cuanto a la densidad de las partículas secas en estufa, los áridos reciclados tienen un valor superior a  $2.1 \text{ Mg/m}^3$  exigido para los áridos gruesos de hormigón tipo A de la EN 206-1 e inferior al mostrado por los áridos naturales, experimentado un descenso de un 1.44% y un 2.16% para la grava (GH) y la gravilla (gH) respectivamente. En el caso del árido fino, el descenso es de un 1.06% para la arena de hormigón (AH) y de un 4.26% para la arena mixta (AM). En el caso de los áridos reciclados de hormigón, esta disminución es debido principalmente al mortero adherido en los mismos, mientras que en el caso de la AM este descenso se debe principalmente a la presencia de mortero adherido (Rc+Ru~85%) y de materiales cerámicos (Rb~15%) que presentan una menor densidad que el árido natural. Asimismo, indicar que los descensos registrados se encuentran dentro del rango (1.62% - 6.92%) y similar (4.51%) obtenido por Pedro et. al. [3] y Zhao et. al. [4] para áridos reciclados de hormigón y arena mixta, respectivamente.

**Tabla 7.** Propiedades físicas, mecánicas y químicas de los áridos

Propiedad [Norma]	Árido							EN 12620
	AN	AH	AM	gN	GN	gH	GH	
Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )	2.82	2.79	2.70	2.78	2.77	2.72	2.73	-
Absorción (% en peso)	1.18	4.42	5.39	0.88	0.78	5.40	3.63	<5
Equivalente de arena (% en peso)	73	61	66	-	-	-	-	>70
Coefficiente de Los Ángeles (% en peso)	-	-	-	16	18	27	27	<40
Índice lajas (% en peso)	-	-	-	20.36	24.79	16.08	20.85	<35
Cloruros solubles en agua (% en peso)	<0.01							<0.05
Sulfatos solubles en ácido (% en peso)	<0.002							<0.80
Sulfatos totales (% en peso)	<0.001							<1

Otra de las propiedades físicas es la absorción de agua, registrándose que la arena de hormigón y la arena mixta tienen una absorción 3.4 veces y 4.6 veces mayor que la arena natural. Respecto al árido grueso reciclado, este incremento es entre 4 y 6 veces mayor dependiendo de la fracción estudiada. Los valores obtenidos son similares a los expuestos por Wagih [5] para el árido reciclado de hormigón, que obtuvo valores de absorción entre 3.9% - 7.15% en el caso de la fracción gruesa, y los expuestos por Kenai [6], que obtuvo unos valores para las fracciones gruesa y fina de un 3.5% y un 5.0% respectivamente. En el caso de la arena mixta (AM), el valor registrado es inferior al recogido previamente por otros autores [7] [8] [9, 10] que observaron valores entre 7.4-15%. Esta gran variabilidad se encuentra estrechamente relacionada con la heterogeneidad composicional que presentan las distintas arenas recicladas mixtas recogidas en la literatura. Adicionalmente, indicar que a pesar de que la gravilla de hormigón y la arena mixta tienen un valor ligeramente superior al 5% permitido por la EHE-08 y la EN 12620, el esqueleto granular de las mezclas formuladas presentan todas ellas un valor inferior al límite establecido.

En cuanto a calidad de los finos, el equivalente de arena de las arenas recicladas tiene un valor inferior al mínimo requerido en la EHE-08, contando el árido de hormigón con una menor calidad que el árido mixto.

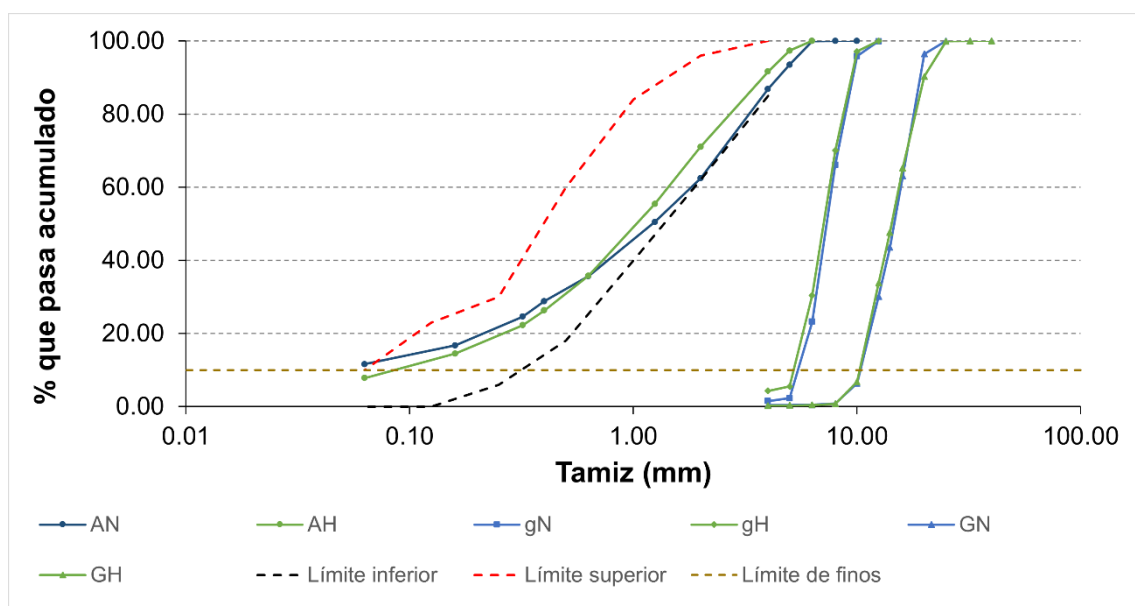
Respecto al índice de lajas, el árido reciclado tiene un valor inferior al mostrado por cada fracción de los áridos naturales, debido a que los áridos reciclados tienen unas aristas más suaves por la

presencia del mortero, dotándoles de una forma más redondeada. Respecto al coeficiente de Los Ángeles, los nuevos áridos tienen una menor resistencia a la fragmentación debido principalmente a la presencia de mortero adherido, haciendo que estos sean más friables que los áridos naturales. No obstante, el valor del coeficiente se encuentra por debajo del 40% y 50% en peso exigido por la EHE-08 y EN 206-1 para áridos gruesos reciclados, respectivamente. Adicionalmente, estos valores se encuentran próximos [11, 12] o son superiores [6] a los obtenidos previamente por otros autores.

En el caso de las propiedades químicas, todos los áridos cumplen los requisitos establecidos en la EHE-08 relativos al contenido de cloruros y sulfatos, tanto solubles en ácido como totales, así como se encuentran exentos de materia orgánica.

La Figura 8 muestra las curvas granulométricas de los áridos utilizados junto al límite superior e inferior del huso granulométrico recomendado en el artículo 28.4.1 de la EHE-08 para los áridos finos empleados en hormigones estructurales, así como el límite de contenido máximo de finos que pasan por el tamiz de 0.063 mm. En la misma, se puede observar, en el caso de la fracción gruesa ( $d > 4$  mm) las curvas granulométricas de los áridos naturales y reciclados son prácticamente iguales, por lo que la granulometría de estos áridos no influirá en la trabajabilidad o comportamiento de los hormigones reciclados. En el caso de la fracción fina, independiente de su naturaleza todas ellas se encuentran dentro del huso granulométrico y muestran una distribución similar lo que no afectará al comportamiento de los hormigones.

En cuanto, el contenido de finos de la arena natural es ligeramente superior al límite del 10%, indicado en la EHE-08 para hormigones con áridos de naturaleza no caliza sometidos a clases generales de exposición tipo I (XO) y II (XC) y a ninguna clase específica de exposición.



**Figura 8.** Distribución granulométrica de los áridos

Finalmente, la Figura 9 muestra los resultados de la reactividad álcali – sílice de los áridos reciclados según el método acelerado en probetas de mortero recogido en la norma UNE 146508 [13]. En la misma, se puede observar que la expansión experimentada por los morteros fabricados que incorporan como esqueleto granular los áridos objeto de estudio es inferior a 0.10% a los 14 días de ensayo, tal y como establece la normativa para considerar a un árido no reactivo. Asimismo, se aprecia que el árido procedente del machaqueo de hormigón tiene una expansión mayor que el árido mixto, lo que podría estar asociado a la capacidad de liberar álcalis retenidos en la solución porosa del mortero presente en la fracción Rc (hormigón y mortero adherido) que se encuentra en mayor proporción en el árido reciclado de hormigón que en el mixto [14].

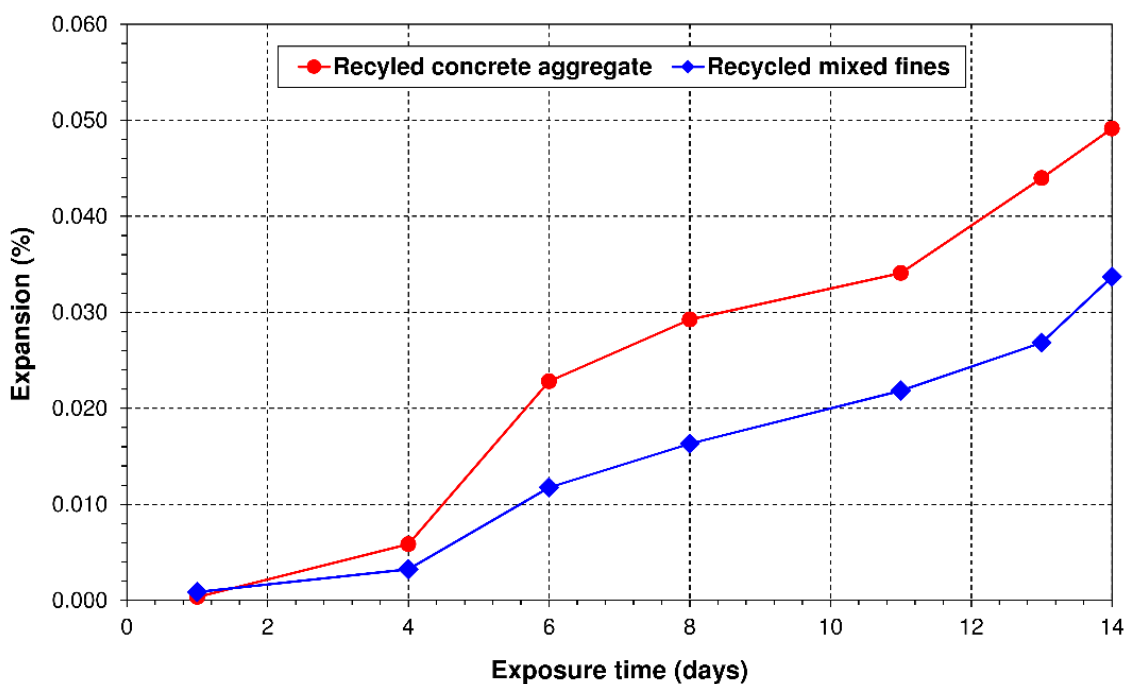


Figura 9. Reacción álcali – sílice de los áridos reciclados

## 2 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

La Tabla 8 muestra las propiedades de los distintos hormigones en estado fresco, observándose en un primer lugar que todas las mezclas presentan una consistencia blanda (6 – 9 cm) según lo dispuesto en el artículo 31.5 de la EHE-08, lo que se corresponde con una consistencia tipo S2 según la norma EN 206 [1]. Estos resultados ponen de manifiesto que la incorporación del árido reciclado no influye en la trabajabilidad de los hormigones independientemente de su fracción, porcentaje de sustitución y naturaleza. Este comportamiento se encuentra en consonancia con lo observado por otros autores que incorporaban hasta un 100% de áridos reciclados de hormigón [15], mixtos [10, 16] o cerámicos [17], tanto su fracción gruesa como fina.



**Tabla 8.** Propiedades en estado fresco

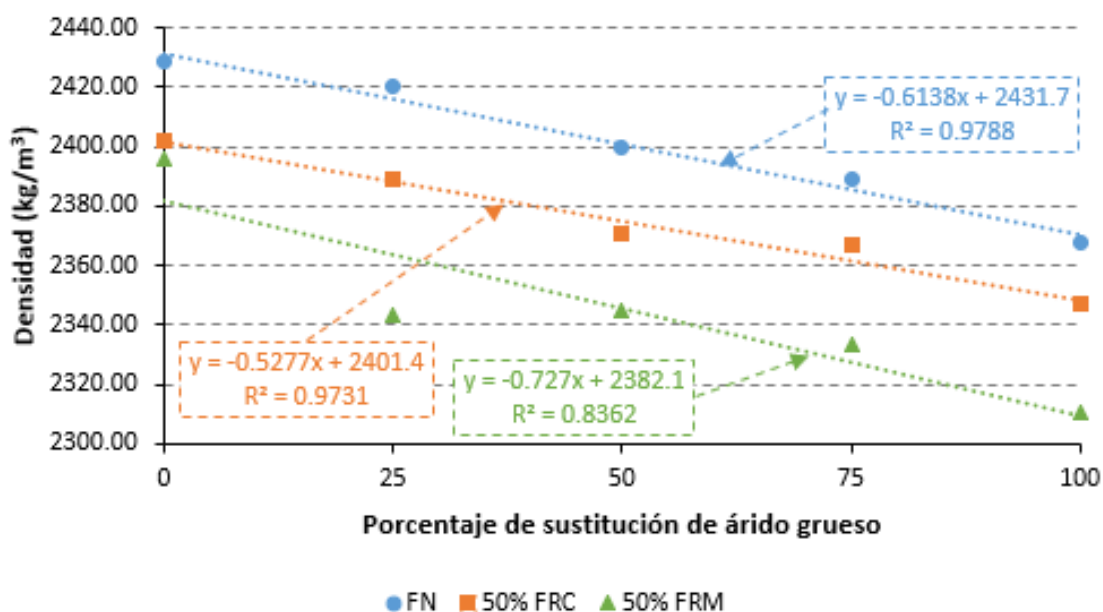
<b>Mezcla</b>	<b>Asentamiento (mm)</b>	<b>Aire ocluido (vol. %)</b>
<b>HP</b>	82.8	1.63
<b>HR-0+10</b>	65.0	1.58
<b>HR-0+20</b>	75.0	1.60
<b>HR-0+50</b>	80.0	1.68
<b>HR-25</b>	78.0	1.66
<b>HR-25+10</b>	77.5	1.78
<b>HR-25+20</b>	77.1	1.74
<b>HR-25+50</b>	87.0	1.80
<b>HR-50</b>	89.0	1.66
<b>HR-50+10</b>	82.0	1.66
<b>HR-50+20</b>	60.0	1.82
<b>HR-50+50</b>	77.5	1.74
<b>HR-75</b>	66.3	1.73
<b>HR-75+10</b>	90.0	1.60
<b>HR-75+20</b>	75.0	1.73
<b>HR-75+50</b>	92.5	1.68
<b>HR-100</b>	72.0	1.82
<b>HR-100+10</b>	90.0	1.90
<b>HR-100+20</b>	90.0	1.90
<b>HR-100+50</b>	80.0	1.90
<b>HR-0+50M</b>	70.0	2.00
<b>HR-25+50M</b>	67.5	3.70
<b>HR-50+50M</b>	70.0	3.17
<b>HR-75+50M</b>	75.0	3.15
<b>HR-100+50M</b>	75.0	2.70

En el caso de la densidad en estado fresco, la incorporación del árido reciclado provoca descensos de la densidad conforme aumenta el porcentaje de sustitución debido a la menor densidad de estos nuevos áridos. De este modo, los hormigones con arena mixta (AM) son menos densos que los que presentan arena de hormigón (AH), los cuales son menos densos que los hormigones con arena natural (AN). Respecto a las pérdidas obtenidas en este trabajo, señalar que concuerdan con las registradas por Xiao et. al. [15], que obtuvieron descenso de entre un 2.4% y un 5%.

## Capítulo 4. Resultados

Por otro lado, el contenido de aire ocluido para las mezclas con arena natural y arena de hormigón se sitúa entre un 1.58% y un 1.90%. Este valor es ligeramente superior en el caso de los hormigones con arena mixta (AM) (entre un 2.70% y un 3.70%), debido a su menor densidad y consecuentemente mayor porosidad. Estos valores se encuentran en consonancia con los valores obtenidos previamente por Cantero et. al. [18] y Yaprak [19] en hormigones con fracción gruesa (6/12 y 12/22 mm) reciclada mixta y arena fina de hormigón respectivamente. Asimismo, Simsek [20] obtuvo un comportamiento similar, con ligeras variaciones pero una tendencia ascendente conforme aumenta el porcentaje de sustitución, tanto para la fracción gruesa como para la fracción fina.

La Figura 10 muestra las mezclas del primer grupo de análisis agrupadas por la cantidad de arena reciclada que contienen. En este caso, se pone de manifiesto la relación lineal ( $R^2 > 0.8$ ) existente entre el porcentaje de sustitución de árido grueso y la densidad en estado fresco, para las familias de hormigones con distintas arenas. Asimismo, las expresiones matemáticas obtenidas permitirán calcular la densidad en función del porcentaje de sustitución de árido grueso (véase **Figura 10**), manteniendo constante la proporción de arena natural y arena reciclada. Adicionalmente, se pone de manifiesto que esta propiedad desciende de una forma más importante en los hormigones con arena mixta que la de hormigón debido a la diferencia de densidades existente entre el árido natural y árido mixto.



**Figura 10.** Densidad en estado fresco agrupada según el contenido de árido fino reciclado

Por otro lado, la Figura 11 muestra la densidad en estado fresco en función del porcentaje de sustitución total de árido natural por árido reciclado de hormigón, observándose que la densidad disminuye conforme aumenta el contenido de árido reciclado, registrando pérdidas inferiores al 5% en todos los casos. Como se puede observar, la expresión propuesta muestra una clara relación

lineal ( $R^2 > 0.8$ ) entre el porcentaje de sustitución y la densidad, permitiendo estimar la densidad en función de la cantidad de árido sustituida.

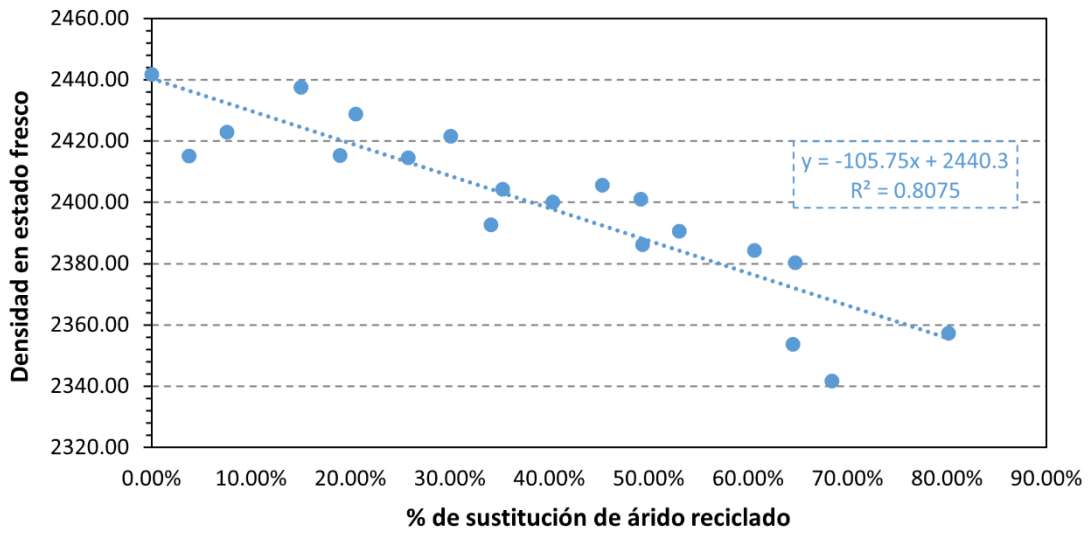


Figura 11. Densidad en estado fresco de las mezclas que contienen árido reciclado de hormigón

### 3 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

#### 3.1 DENSIDAD APARENTE

La Figura 12 muestra la variación de la densidad aparente de los hormigones reciclados respecto al hormigón de referencia (HP) en función del porcentaje de sustitución de árido grueso, para las familias de hormigón con arena natural (AN), arena de hormigón (AH) y arena mixta (AM).

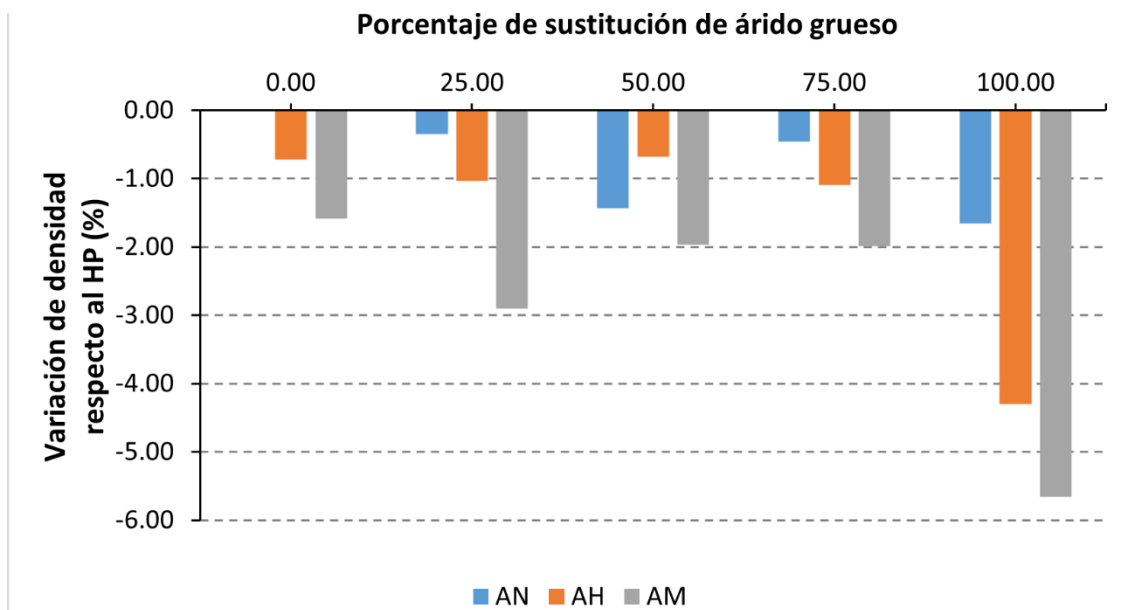


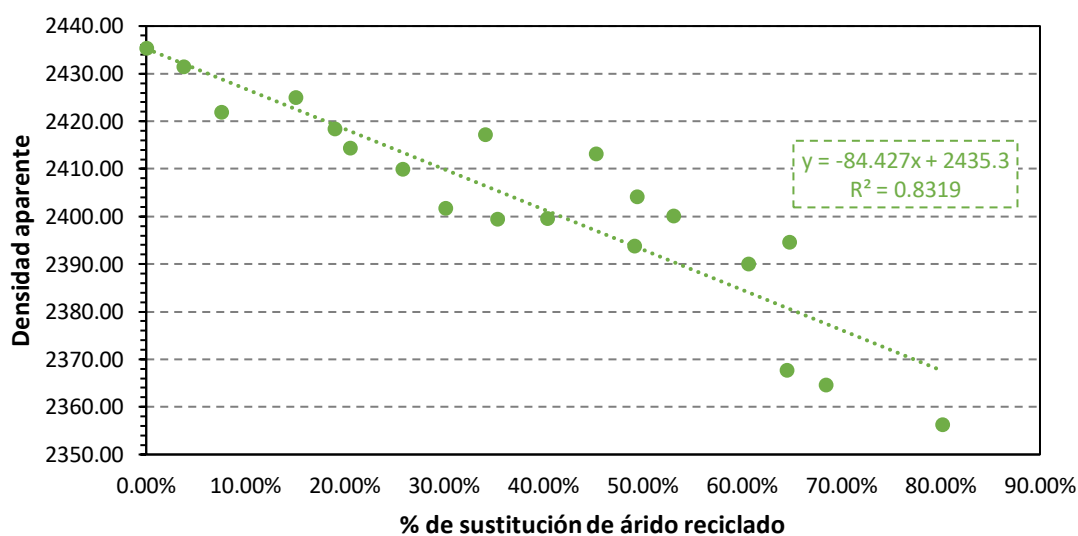
Figura 12. Variación de la densidad aparente en estado endurecido

## Capítulo 4. Resultados

En la misma, se observa que en todos los casos existe un descenso de esta con la incorporación del árido reciclado, siendo esta mayor en aquellos escenarios en los que se incorpora arena mixta en su formulación. Este comportamiento, está estrechamente relacionado con las propiedades intrínsecas de los nuevos áridos (GH, gH, AH y AM).

Asimismo, indicar que la pérdida de densidad se sitúa por debajo del 3% para porcentajes de sustitución de árido grueso inferior o igual al 75% e independientemente del tipo de árido fino utilizado. Asimismo, en el caso de sustituciones totales de árido grueso, el descenso de la densidad es mayor situándose éste en un 4.2% y 5.6% cuando los hormigones incorporan adicionalmente arena de hormigón y arena mixta, respectivamente. Estos descensos registrados, son inferiores a los observados por Dimitriou [21] que registró pérdidas de entre un 6% y un 7% para una sustitución total de la fracción gruesa por árido de hormigón.

Por otro lado, la Figura 13 muestra los datos de densidad aparente en función de la cantidad de árido reciclado de las diferentes mezclas que incorporan áridos reciclados de hormigón, así como el ajuste realizado y la expresión matemática propuesta. En este caso, la expresión propuesta también muestra la relación lineal ( $R^2 > 0.8$ ) entre la densidad y el porcentaje de árido reciclado.



**Figura 13.** Densidad aparente de las mezclas que incluyen árido de hormigón

El comportamiento de la densidad es muy similar al anteriormente expuesto para la densidad en estado fresco, obteniendo sin embargo valores ligeramente inferiores. El rango de pérdida de densidad (0.16%-3.25%) es inferior al obtenido en estado fresco, aunque la tendencia de los datos es muy similar. Tuyan [22] sostiene que este descenso en la densidad aparente está directamente relacionada a la presencia de macroporos en el mortero adherido en los áridos reciclados de hormigón, con una relación directa entre la cantidad de árido sustituida y el descenso de la densidad.

### 3.2 POROSIDAD

La Tabla 9 muestra las propiedades del sistema poroso (porosidad total, volumen de macroporos y tamaño medio de poro) de alguno de los hormigones estudiados, observándose que los hormigones HR-25 y HR-25+50 tiene una Pt, MP y MPD inferior al HP, lo que es indicativo que la incorporación de la fracción gruesa reciclada de forma individual o simultánea con la fracción fina de hormigón provoca un descenso de estas propiedades. Sin embargo, en las mezclas HR-75 y HR-75+50 se aprecia que los nuevos hormigones tienen unos valores superiores al hormigón de referencia. Esta tendencia, es registrada, independientemente del porcentaje de fracción gruesa, cuando se incorpora la arena mixta reciclada (HR-25+50M y HR-50+50M). Este comportamiento, es observado por Bravo et al. [10] que registro un mayor macroporosidad en los hormigones que incorporaban árido fino reciclado con un menor porcentaje de Rc+Ru.

**Tabla 9.** Propiedades del sistema poroso.

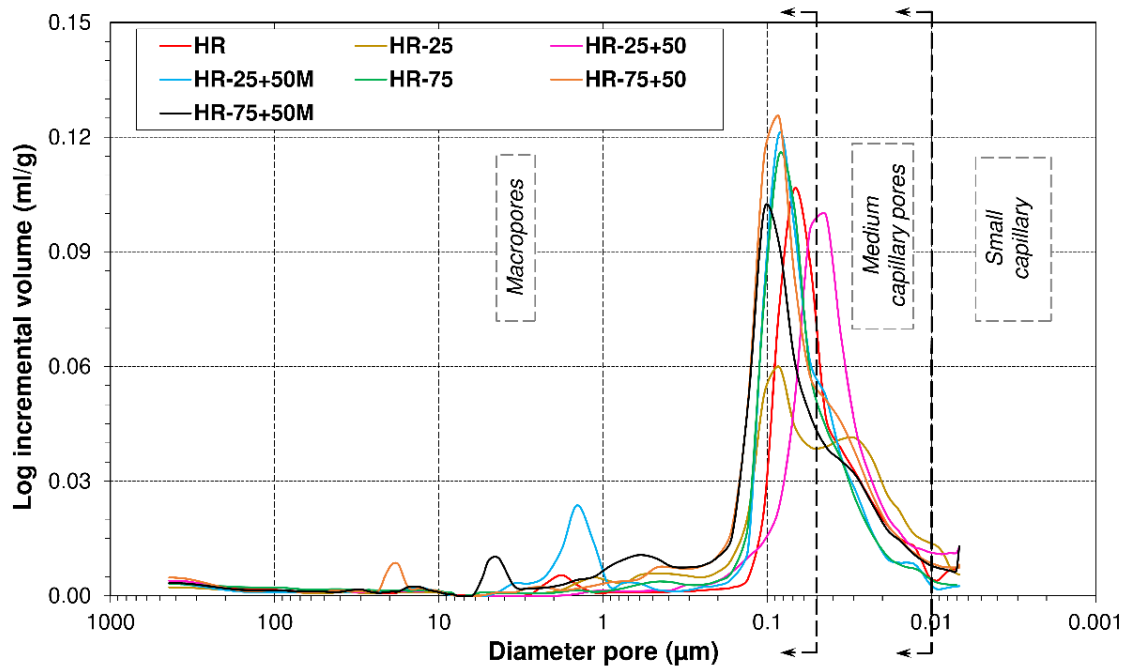
Mezcla	Pt (vol%)	MP (vol%)	MPD ( $\mu\text{m}$ )
HP	11.65	6.49	0.0395
HR-25	11.22	5.79	0.0353
HR-75	12.37	6.87	0.4540
HR-25+50	11.15	3.89	0.0330
HR-75+50	13.08	8.07	0.0479
HR-25+50M	13.29	9.16	0.0508
HR-75+50M	13.82	9.54	0.0541

Este comportamiento observado estaría relacionado con la mayor porosidad (menor densidad) del árido reciclado, independientemente de la fracción utilizada. Adicionalmente, indicar que efecto negativo, se vería compensado para porcentajes pequeños de sustitución de árido grueso reciclado por la presencia en el mortero adherido a los mismos de partículas de cemento anhidro que continuará su hidratación, generando generar una matriz cementante menos porosa.

En cuanto a los valores obtenidos de porosidad se encuentra dentro del rango típico de valores de porosidad (10% - 20%) para hormigones [23], al mismo tiempo que son similares a los registrados

en otros hormigones con áridos reciclados procedentes de la gestión de los residuos de construcción y demolición (10%-23%) [24-27].

La Figura 14 muestra la distribución de tamaño de poro de los hormigones, observándose que en el caso del HR-25 y HR-25+50 se produce un refinamiento del sistema poroso (disminución tamaño medio de poro), mientras que para el resto de hormigones analizados se produce un aumento del mismo (ver Tabla 9).



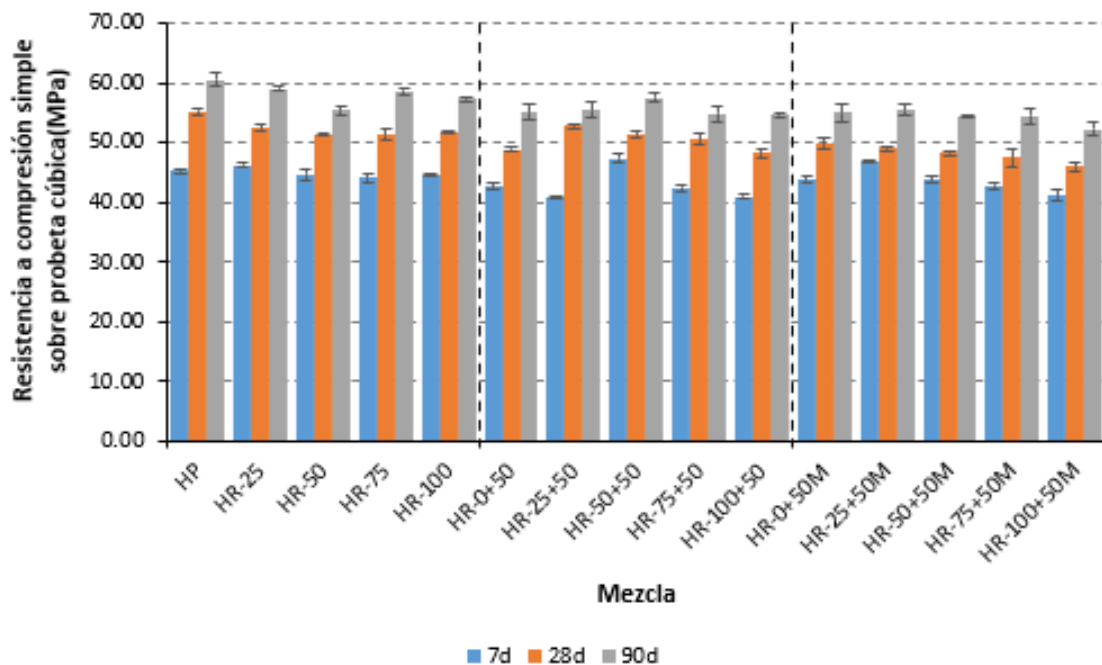
**Figura 14.** Distribución de tamaño de poro de los hormigones estudiados a los 28 días de curado

### 3.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

#### 3.3.1 Análisis estadístico de las mezclas del grupo 1

La Figura 15 muestra la resistencia a compresión de las mezclas y a las diferentes edades de curado, observándose en la misma que todos los hormigones tienen una resistencia a compresión media mayor que los 37 MPa de diseño a los 28 días de curado. Asimismo, se observa que la incorporación de estos nuevos áridos reciclados (gruesos y/o finos) provoca, en función del porcentaje de incorporación y edad de curado, un incremento máximo de un ~5% (HR-50+50 a los 7 días) y un descenso máximo de ~17% (HR-100+50 M a los 28 días) respecto al HP. Adicionalmente, indicar que la pérdida prestacional experimentada es mayor en aquellas situaciones en las que se incorpora simultáneamente arena mixta y árido grueso de hormigón. A los 7 días de curado se registra un incremento de un ~3% en la mezcla HR-25+50M, mientras que la mayor pérdida se corresponde con la mezcla HR-100+50M a los 28 días de edad, con un descenso de un ~17%. Este comportamiento está relacionado con la presencia de un mayor

número de ITZ árido reciclado/ pasta [28] (mayor heterogeneidad), a que estas nuevas ITZs son más débiles que las que tienen lugar árido natural/ pasta [29], así como al efecto que tiene la incorporación de estos áridos reciclados sobre la distribución de tamaño de poro, poniéndose de relieve que un aumento del volumen de macroporos ( $> 0.05 \mu\text{m}$ ) se traduce en una disminución de la resistencia [30] y pérdida de la capacidad de transferencia de carga debido a la presencia del mortero adherido en el árido de hormigón (RCA) [11]. Respecto, al mayor descenso de las mezclas que incorporan arena mixta (AM) respecto a las mezclas con arena de hormigón (AH) estaría relacionada con su efecto en la estructura porosa de los hormigones, con su menor densidad y mayor fragilidad asociada a la presencia en su composición de material cerámico que se caracteriza por presentar una mayor porosidad y menor resistencia a la fragmentación que los áridos desligados (Ru) y la fracción de hormigón y morteros adherido (Rc), principales constituyentes de la arena de hormigón (AH).



**Figura 15.** Resistencia a compresión simple sobre probeta de  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  Grupo 1.

Atendiendo a las mezclas que incorporan exclusivamente árido grueso (gH y GH), los valores oscilan entre una ganancia de un  $\sim 2\%$  (mezcla HR-25 a 7 días) hasta pérdidas de un  $7\%$  (mezcla HR-75 a 28 días). Estos resultados son similares a los obtenidos por algunos autores que obtuvieron pérdidas de un  $\sim 6\%$  sustituyendo la totalidad de la fracción gruesa por árido de hormigón [11, 31]. Por otro lado, Wang [32] afirma que el descenso de resistencia no varía considerablemente a la hora de sustituir la fracción gruesa, con pérdidas de entre un  $8.7\%$  y un  $14\%$ .

En el caso de las mezclas con arena de hormigón (AH), la incorporación simultánea de las fracciones recicladas produce pérdidas de resistencia inferiores al  $13\%$  independientemente del

## Capítulo 4. Resultados

porcentaje de sustitución y la edad. Estos resultados son similares a los obtenidos por algunos autores, que obtuvieron pérdidas un 6% y un 10% sustituyendo un 50% de la fracción fina y un 50% y un 100% respectivamente de la fracción gruesa [33]. Por otro lado, Velay [34] registró pérdidas de entre un 5% y un 20% para sustituciones de hasta un 30% en ambas fracciones.

Finalmente, algunos autores han estudiado la pérdida de resistencia en mezclas que incorporan exclusivamente la fracción fina, con pérdidas de un ~8% para un 24% de sustitución de dicha fracción [35] o de un ~11% para un 50% de sustitución [36]. En el caso de sustituir la totalidad de la fracción fina, las pérdidas son superiores, llegando a valores entre un 20% y un 30% [8, 37, 38].

En el caso de incorporar arena mixta (AM), la pérdida de resistencia es similar a 28 y 90 días, con disminuciones de un 16.78% y un 13.60% respectivamente para la mezcla HR-100+50M. A 7 días la disminución de resistencia es menor que en caso anterior, llegando al 9.78% para una sustitución total del árido grueso (mezcla HR-100+50M). Esta pérdida es similar a la registrada por Corinaldesi [9], con una pérdida de un 8% para una sustitución total en ambas fracciones. Por otro lado, la mayoría de los valores encontrados en la bibliografía muestran pérdidas muy superiores a las obtenidas en este trabajo. Bravo [10] obtuvo pérdidas a los 28 días de entre un 17% y un 30% al sustituir el 50% de la arena por arena reciclada mixta ( $68% < R_u + R_c < 75%$  y  $11.6% < R_b < 26%$ ), mientras que en este trabajo la pérdida registrada en el HR-0+50M es ~3% respecto al hormigón HP. Por su parte, Khatib y Bravo [8, 10] obtuvieron pérdidas de hasta un 20% para el mismo porcentaje de sustitución.

**Tabla 10.** Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a compresión. Grupo 1.

Análisis	Parámetros del modelo estadístico									
	$\mu_{11}$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\beta_2$	$\alpha\beta_{22}$	$\alpha\beta_{32}$	$\alpha\beta_{42}$	$\alpha\beta_{52}$
AN-AH 7d	45.27	1.00	NS	-1.13	NS	-2.64	-2.80	5.34	NS	NS
AN-AM 7d	45.27	NS	NS	-1.13	NS	-1.51	1.96	NS	NS	-1.91
AN-AH 28d	55.20	-2.87	-3.84	-3.89	-3.49	-6.33	6.81	6.30	5.64	2.79
AN-AM 28d	55.20	-2.87	-3.84	-3.89	-3.49	-5.43	2.10	2.25	NS	NS
AN-AH 90d	60.53	NS	-5.12	-1.97	-3.28	-5.39	NS	7.55	NS	2.72
AN-AM 90d	60.53	NS	-5.12	-1.97	-3.28	-5.51	NS	4.51	NS	NS

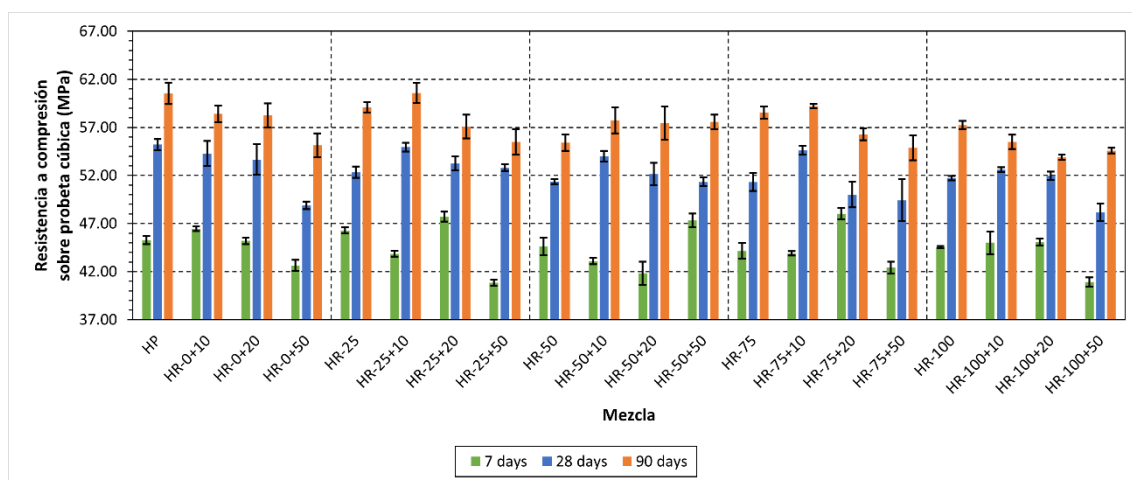
Según el análisis estadístico realizado (ver Tabla 10), la sustitución parcial de la arena natural (AN) por árido reciclado (AM/AH) provoca una disminución significativa de la resistencia a compresión independientemente de la naturaleza del árido reciclado y la edad estudiada.



Asimismo, el efecto relativo debido al árido grueso ( $\alpha_i$ ) muestra pequeñas pérdidas de resistencia a todas las edades estudiadas. Sin embargo, se encuentra un pequeño aumento relativo en las mezclas con bajos porcentajes de sustitución (25%) a los 7 días de edad. Por otro lado, el efecto relativo debido al árido fino ( $\beta_j$ ) muestra pérdidas de resistencia en todas las edades y mezclas estudiadas. Por último, respecto a la interferencia entre los dos áridos ( $\alpha\beta_{ij}$ ), la incorporación simultánea de árido grueso y fino de hormigón produce un efecto positivo significativo en todos los análisis realizados, contrarrestando los efectos relativos descritos anteriormente ( $\alpha_i$  y  $\beta_j$ ). No obstante, puede establecerse que la mezcla con un porcentaje de 25% de árido grueso y arena de hormigón (AH) tiene un comportamiento óptimo, al presentar un descenso inferior al 5% respecto al HP.

### 3.3.2 Análisis estadístico de las mezclas del grupo 2

La Figura 16 muestra los resultados de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días de edad sobre probeta cúbica de 150x150x150 mm, observándose que todas las mezclas superan la resistencia de diseño correspondiente con un hormigón C30/37 ( $f_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$ ), lo cual indica que todas las mezclas, independientemente del contenido y fracción reciclada utilizada, podrían ser utilizadas desde un punto de vista de esta propiedad en la fabricación de hormigones estructurales.



**Figura 16.** Resistencia a compresión simple sobre probeta de 15x15x15 cm<sup>3</sup>. Grupo 2.

En el caso de las mezclas que incorporan solo la fracción gruesa del árido se presentan pequeñas pérdidas de resistencia, que se incrementan ligeramente conforme aumenta la edad. A 7 días, la mezcla HR-25 presenta incluso una resistencia superior a la mezcla de referencia (+2.22%). Sin embargo, el resto de mezclas disminuyen su resistencia entre un 1.42% y un 2.5%. A 28 y 90 días las pérdidas son muy similares en todas las mezclas, con descensos entre un 5.20% y un 7.04% para 28 días y entre un 2.39% y un 8.45% para 90 días. Este comportamiento es similar al encontrado por Chang [39], que obtuvo un incremento de resistencia a 7 días de un 1.35% para un 25% de sustitución de árido grueso de hormigón. Para 28 días de edad obtuvo pérdidas de un

## Capítulo 4. Resultados

3.86% y un 7% para porcentajes de sustitución de un 25% y un 75% respectivamente. Por su parte, Pedro [3] obtuvo pérdidas de entre un 3.2% y un 7.6% para un hormigón con  $f_{ck}$  objetivo de 45 MPa, sustituyendo de un 25% a un 100% de la fracción gruesa por áridos reciclados de hormigón.

Respecto a la fracción fina, la pérdida de resistencia es similar la que provoca la sustitución de la fracción gruesa para porcentajes inferiores al 20%. A 7 días, el comportamiento es muy similar al descrito anteriormente, registrando incluso un ligero incremento (2.61%) para la mezcla HR-0+10. A 28 y 90 días las pérdidas oscilan entre un 1.67% y un 5.83%. En el caso de la mezcla HR-0+50, las pérdidas de resistencia son significativamente mayores, con pérdidas de entre un 5.83% y un 11.46%. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos por otros autores. Mohammed [40] registró una disminución de resistencia de un 14% aproximadamente para un 50% de sustitución de la fracción fina por árido de hormigón, asociando estas pérdidas con el aumento significativo de la absorción del árido reciclado. Para porcentajes de sustitución más bajos, los resultados de Zega [41] son muy similares a los hallados en este trabajo, con pérdidas en torno al 2% sustituyendo un 20% de la fracción fina por arena de hormigón. A 90 días la diferencia con respecto al hormigón de referencia incluso se ve reducida hasta un 1.6% aproximadamente. En este caso, una reducción de la relación agua/cemento efectiva lleva a una mejora en la interfase (ITZ), lo que provoca un comportamiento muy similar al hormigón de referencia, mejorando incluso en otras propiedades durables.

Por último, la incorporación simultánea de ambas fracciones mitiga el efecto de pérdida de resistencia, obteniendo hormigones con resistencias muy similares a los anteriores, pero con un mayor contenido de árido reciclado. El efecto de la incorporación simultánea se puede observar con los datos del análisis estadístico, cuyos parámetros se recogen en la **Tabla 11**.

Desde el punto de vista estadístico, el efecto de incorporar el árido grueso es generalmente negativo, tal como reflejan los datos expuestos en la Tabla 11. Sin embargo, el comportamiento a 7 días cuenta con factores no significativos que muestran que la tendencia no es tan clara como en el resto de edades. En el caso del árido fino, los factores siguen la misma tendencia, lo que corrobora la idea de que la incorporación de cualquier fracción del árido provoca una disminución de resistencia.

Por otro lado, los factores de interacción muestran valores positivos para 28 y 90 días en todos los casos, lo que indica que la pérdida de resistencia se ve mitigada cuando se incorporan ambas fracciones simultáneamente, lo que contribuye a su vez a obtener hormigones con resistencias similares a los que incorporar solo un tipo de fracción (gruesa o fina), aumentando sin embargo el porcentaje de árido reciclado en las mezclas.

**Tabla 11.** Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a compresión. Grupo 2.

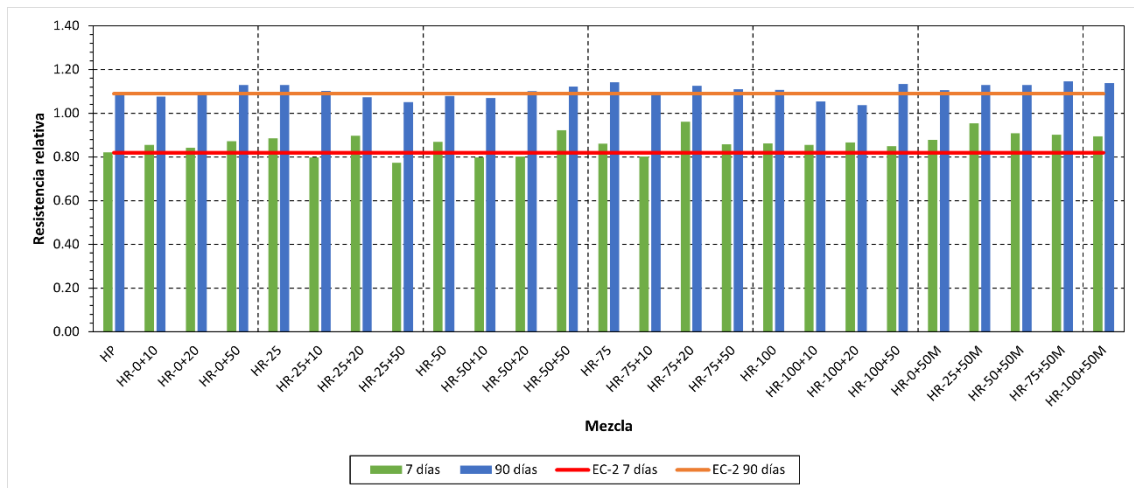
Parámetros	7 días	28 días	90 días
$\mu_{11}$	45.27	55.20	60.53
$\alpha_2$	1.00	-2.87	NS
$\alpha_3$	NS	-3.84	-5.12
$\alpha_4$	-1.13	-3.89	-1.97
$\alpha_5$	NS	-3.49	-3.28
$\beta_2$	1.18	NS	-2.12
$\beta_3$	NS	-1.56	-2.28
$\beta_4$	-2.64	-6.33	-5.39
$\alpha\beta_{22}$	-3.60	3.53	3.62
$\alpha\beta_{32}$	-2.72	3.57	4.44
$\alpha\beta_{42}$	-1.44	4.24	2.78
$\alpha\beta_{52}$	NS	NS	NS
$\alpha\beta_{32}$	1.51	2.47	NS
$\alpha\beta_{33}$	-2.71	2.36	4.32
$\alpha\beta_{43}$	3.96	NS	NS
$\alpha\beta_{53}$	NS	NS	NS
$\alpha\beta_{23}$	-2.80	6.81	NS
$\alpha\beta_{33}$	5.34	6.30	7.55
$\alpha\beta_{43}$	NS	5.64	NS
$\alpha\beta_{53}$	NS	2.79	2.72

### 3.3.3 Evolución de resistencias

Respecto a la evolución de resistencia en el tiempo, la Figura 17 muestra los valores de resistencia relativa de las mezclas respecto al valor de referencia a 28 días, así como la resistencia relativa estimada en el Eurocódigo-2 (EC-2) a 7 y 90 días. En la misma, se puede observar, que todas las mezclas presentan una evolución similar en la ganancia de resistencia, llegando en la mayoría de los casos a alcanzar resistencias mayores de las esperadas tanto a 7 como a 90 días de edad. Este resultado pone de manifiesto que la incorporación de la fracción gruesa y/o fina reciclada de hormigón no influye en el proceso de hidratación del cemento. Asimismo, indicar que el comportamiento registrado a 7 días en el que se observa unas resistencias mayores que las esperadas por el EC concuerda con los resultados de Surendar [42], que evaluó el comportamiento de mezclas con entre un 10% y un 75% de sustitución de la fracción gruesa por árido lavado de

## Capítulo 4. Resultados

hormigón. En el caso de las mezclas con arena reciclada mixta, la resistencia inicial conseguida es ligeramente superior. Para 90 días la resistencia es igualmente superior a la teórica en la mayoría de los casos, alcanzando los valores relativos más altos para las mezclas que no contienen arena reciclada. Estos resultados ponen de relieve que la inclusión de estos nuevos áridos reciclados, independientemente de la fracción de la que se trate, no interfieren en la ganancia de resistencia con el tiempo, tal y como observaron previamente otros autores que utilizaban de forma simultánea fracción fina y gruesa [11] o solamente la fracción gruesa de áridos reciclados procedentes de RCD [18].



**Figura 17.** Resistencia relativa a 7 y 90 días.

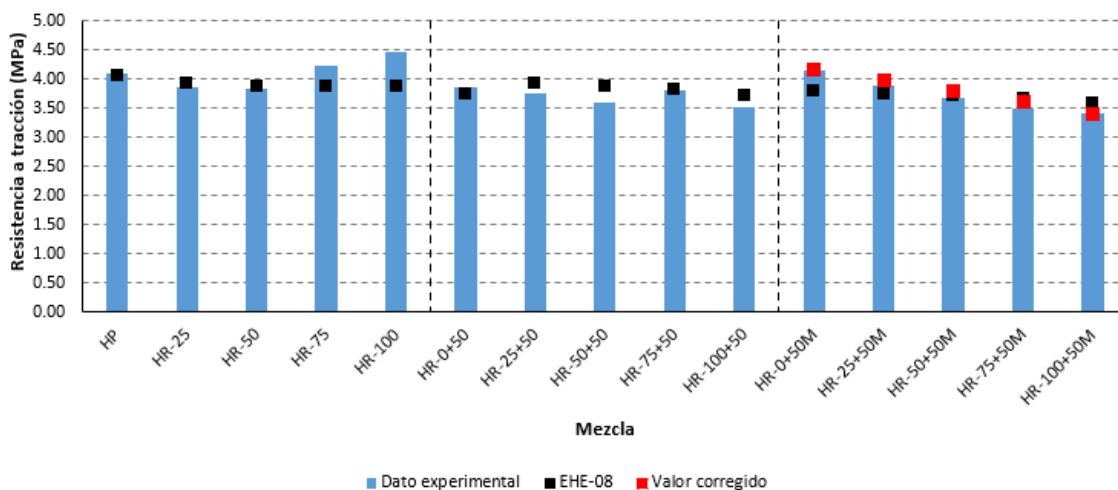
Finalmente, indicar que en todas las mezclas y edades estudiadas la forma de rotura de los hormigones es adecuada según lo dispuesto en la norma EN 12390-3, con una forma de rotura muy similar, tal y como puede observarse en la Figura 18.



**Figura 18.** Forma de rotura para las mezclas HP (izquierda) y HR-100+50M (derecha).

### 3.4 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA

La Figura 19 muestra los valores experimentales obtenidos para la resistencia a tracción indirecta junto con la resistencia estimada ( $f_{ctm}$ ) a partir de la resistencia a compresión de cada mezcla ( $f_{ck} = f_{cm} - 8$ ) según la expresión recogida en el artículo 39.1 de la EHE-08 ( $f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{2/3}$ ) y los valores obtenidos según la expresión propuesta para cada caso (ver Eq. (2) y Eq. (3)).



**Figura 19.** Resistencia a tracción indirecta

En cuanto al comportamiento de las mezclas que incorporan exclusivamente la fracción gruesa (GH y gH) se observa un incremento prestacional a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, llegando a un incremento de resistencia de hasta un 9.49% en el caso de la sustitución total (mezcla HR-100). Por otro lado, cuando se añaden simultáneamente todas las fracciones del árido de hormigón se obtienen resistencias ligeramente inferiores a las de la mezcla de referencia, obteniendo pérdidas de hasta un 14.13% en el caso de la mezcla HR-100+50. Por último, en el caso de la arena mixta, si no se sustituye la fracción gruesa (mezcla HR-0+50M) la resistencia es ligeramente superior, con un incremento de un 1.74%. Sin embargo, la resistencia disminuye conforme aumenta el porcentaje de árido grueso sustituido, llegando a registrar pérdidas de hasta un 16.77% para la mezcla HR-100+50M.

Este comportamiento de la resistencia a tracción concuerda con los resultados obtenidos por otros autores [43, 44] que utilizaban la fracción gruesa del árido reciclado de hormigón obteniendo incrementos de hasta un 18% para un 50% de sustitución. Respecto al árido fino de hormigón (AH), la pérdida de resistencia es inferior a la obtenida por otros autores. Puente de Andrade [35], obtuvo pérdidas de hasta un 14% para un 24% de sustitución de la fracción fina por árido de hormigón. Por otro lado, Salahuddin [45] obtuvo pérdidas similares a las obtenidas en este trabajo, registrando un descenso de un ~6% para un 75% de sustitución de la fracción fina. Estas pérdidas de resistencia conforme aumenta el % de sustitución se deben a una ITZ menos resistente debido a la estructura más porosa de los áridos reciclados [46], debido a la capa de mortero adherido a

## Capítulo 4. Resultados

los áridos y al agua libre en la pasta debido a la mayor absorción de estos áridos [38]. Este comportamiento lleva a pérdidas según estos autores de hasta un 30% en caso de sustituir la totalidad de la fracción fina por arena de hormigón (AH). Sin embargo, Evangelista y de Brito [46] defienden que esta fracción es utilizable hasta un 30% de sustitución sin afectar significativamente a la resistencia.

Atendiendo a las mezclas que sustituyen ambas fracciones del árido por árido de hormigón, las pérdidas son similares a las obtenidas en este trabajo. Wang [32] obtuvo pérdidas de un ~13% sustituyendo un 50% de cada fracción (mezcla HR-50+50). Por su parte, Ajdukiewicz [47] obtuvo pérdidas de entre un 0% y un 15% dependiendo de la calidad del hormigón de origen, llegando a incorporar un 100% de árido reciclado en ambas fracciones.

Por otro lado, en el caso de hormigones con sustitución de arena mixta, Ahmed [48] y Kirthika [49] observaron que la incorporación de arena mixta no provoca un descenso en la resistencia a tracción de los nuevos hormigones. Sin embargo, otros autores obtuvieron pérdidas de en torno a un 10% sustituyendo un 50% del árido fino [10] o un 8% en el caso de la sustitución total en ambas fracciones [9]

**Tabla 12.** Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a tracción indirecta. Grupo 1.

Análisis	Parámetros del modelo estadístico									
	$\mu_{11}$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\beta_2$	$\alpha\beta_{22}$	$\alpha\beta_{32}$	$\alpha\beta_{42}$	$\alpha\beta_{52}$
AN-AH 28d	3.47	NS	NS	0.77	1.01	NS	NS	-0.66	-0.81	-1.35
AN-AM 28d	3.47	NS	0.38	0.77	1.01	0.93	-0.85	-1.35	-1.45	-2.00

Desde el punto de vista estadístico (ver Tabla 12), la sustitución del árido natural por árido reciclado no provoca un efecto significativo en la resistencia a tracción independientemente de la fracción o naturaleza del árido, encontrando tan solo una interferencia negativa a la hora de añadir simultáneamente todas las fracciones del árido reciclado (valores  $\alpha\beta$ ).

Asimismo, para calcular indirectamente la resistencia a tracción a partir de los valores medios de compresión (ver figura 8) se proponen 2 expresiones diferentes en función del porcentaje de sustitución y tipología de arena reciclada: i) una para las mezclas con arena mixta (AM) (Eq. (2)); y ii) otra para las mezclas sin arena reciclada o con un 50% de arena reciclada de hormigón (Eq. (3)) (coincidente con la expresión recogida en la EHE-08. Indicar que utilizando estas expresiones la diferencia entre el valor medio obtenido y el teórico está por debajo del 10% en todos los casos excepto en la mezcla HR-100, en la que el valor estimado es un 13% menor que el obtenido experimentalmente.

$$f_{cm}=0.3f_{ck}^{2/3} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$f_{cm}=0.323 f_{ck}^{2/3} - 0.00539 \%_{AG} \quad \text{Eq. (3)}$$

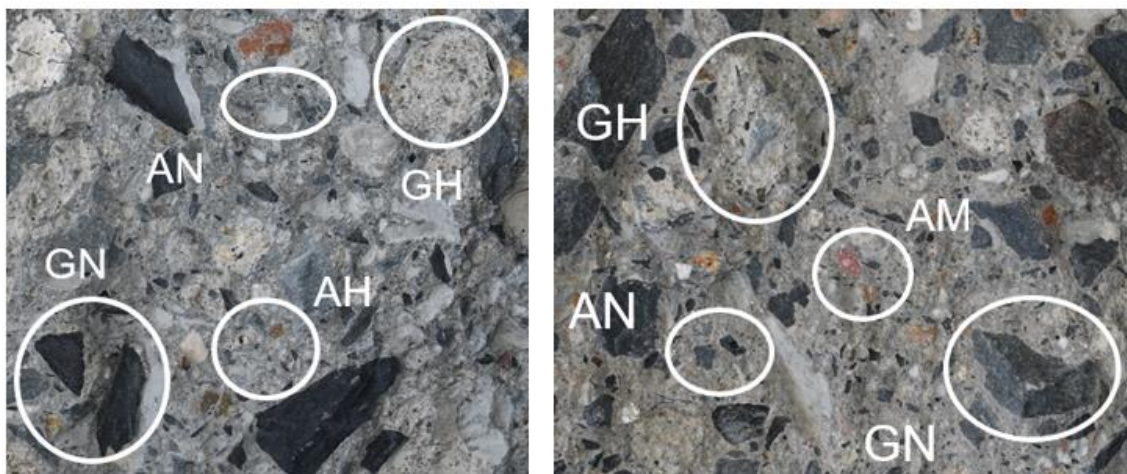
La Tabla 13 recoge las expresiones matemáticas que relacionan la resistencia a tracción y compresión en hormigones reciclados y que han sido propuestas previamente por otros autores. En cuanto a las expresiones planteadas en la presente investigación, para la arena mixta (Eq. (3)) es similar a la propuesta por Li [50], que incluye un factor que corrige el valor de resistencia en función del porcentaje de sustitución de árido reciclado. Por otro lado, la expresión propuesta para los casos de la arena natural y de hormigón (Eq. (2)) es muy similar a las propuestas por Xiao et al. [51] y Guo et. al. [38], que es a su vez son casi idénticas a la recogida en la EHE-08. Por otro lado, Katz [52] propone una expresión similar a la recogida por la normativa ACI 318 [53], modificándola ligeramente. Por su parte, Silva et al. [54] sostiene que la expresión de la normativa no necesita modificarse, si bien se debe introducir un factor en función de la edad del hormigón estudiado.

En este contexto, cabe destacar la expresión propuesta por Fonteboa et al. [55], que además de incluir un factor en función del porcentaje de árido reciclado también tiene en cuenta la absorción de agua para ajustar la resistencia calculada en la normativa.

**Tabla 13.** Expresiones propuestas por otros autores

Autor	Expresión propuesta
Li	$f_{cm}=(0.24-0.06 \cdot \%_{AG})f_{ck}^{2/3}$
Xiao	$f_{cm}=0.24 f_{ck}^{0.65}$
Katz	$f_{cm}=0.59 f_{ck}^{0.5}$
Silva	$f_{cm}(t)= \beta_{cc}(t) ^\alpha f_{cm}$
Fonteboa	$f_{ctm} = \frac{1 - 0.086 \cdot \%_{AG} \cdot \frac{WA}{5}}{1 - 0.605 \%_{AG}} \cdot f_{code}^{(1-0.465 \cdot \%_{AG})}$
<b>NOTA:</b> WA: % de absorción de agua	

Finalmente, indicar que el mecanismo de fallo es igual en todas las mezclas, produciéndose una rotura explosiva (frágil), que lleva a la ruptura del hormigón en pedazos. Asimismo, observando la cara de fractura se puede afirmar que los diferentes componentes de todos los hormigones se distribuyen de forma homogénea, independientemente de si el árido es natural o reciclado, tal y como puede apreciarse en la Figura 20.

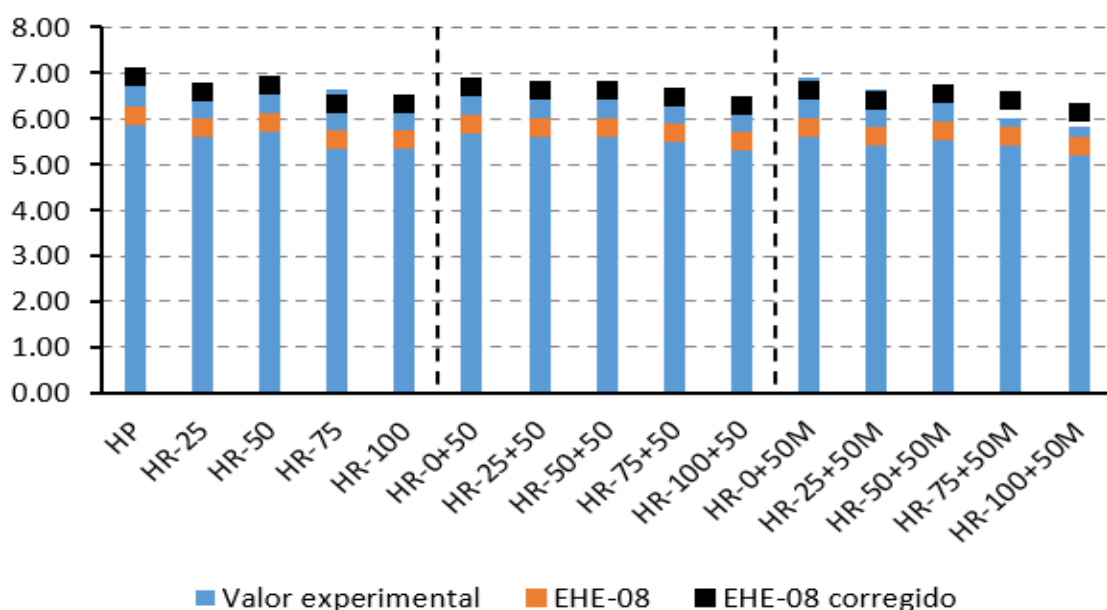


**Figura 20.** Distribución de los diferentes componentes del árido en el hormigón

### 3.5 RESISTENCIA A FLEXIÓN

#### 3.5.1 Análisis estadístico de las mezclas del grupo 1

La Figura 21 muestra los valores experimentales de resistencia a flexión y la resistencia estimada según la expresión recogida en el artículo 39.1 de la EHE-08 ( $f_{ct,m,fl}=1.6 \cdot h/1000 \cdot f_{ct,m}$ ) y la expresión propuesta (Eq. (4)). En la misma, se observa un descenso de la resistencia conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido grueso, llegando las pérdidas hasta un 4.5% para una sustitución total (HR-100). En el caso de las mezclas que incorporan arena reciclada, las pérdidas se mantienen en el mismo rango para porcentajes de sustitución de árido grueso inferiores al 75%. Cuando el porcentaje de sustitución de esta fracción es mayor (100%), la pérdida prestacional llega hasta un 9.5% y un 14.8% para las mezclas con un 50% de arena de hormigón y arena mixta, respectivamente.



**Figura 21.** Resistencia a flexión. Análisis grupo 1.



Este comportamiento es ligeramente mejor al obtenido por otros autores utilizando otra tipología de áridos reciclados, como áridos mixtos [18] o cerámicos [56]. Para sustitución total del árido grueso (mezcla HR-100) las pérdidas obtenidas son del mismo orden de magnitud que las obtenidas por Malesev [57], con pérdidas de alrededor de un 4% con sustitución total de la fracción gruesa por árido de hormigón, e inferiores a las obtenidas por Topcu y Sengel [58], que obtuvieron pérdidas de entre un 7.5% y un 9% sustituyendo todo el árido natural por árido reciclado de hormigón. En el caso de la fracción fina del árido de hormigón (FRC), los valores obtenidos en este trabajo se encuentran en el rango de entre un 2% y un 16% de pérdidas obtenido por Salahuddin [45] para un 75% de sustitución del árido fino. Además, Lotfy [29] obtuvo una ligera disminución de la resistencia a flexión conforme aumenta el % de sustitución del árido reciclado, pero no lo considera significativo (pérdidas menores al 30%).

Finalmente, en el caso de la arena mixta (AM), algunos autores han registrado aumentos de resistencia al utilizar este tipo de árido. Concretamente, Kirthika y Ahmed [48, 49] obtuvieron aumentos de resistencia de un 6.7% y un 3.2% respectivamente para un hormigón con un 50% de sustitución de la fracción fina.

Asimismo, indicar que en todas las mezclas con independencia de su esqueleto granular, el mecanismo de fallo consistió en una grieta alargada que comienza en el plano de máxima flecha y con orientación normal a las tensiones normales generadas por la flexión [59].

**Tabla 14.** Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a flexión. Grupo 1.

Análisis	Parámetros del modelo estadístico									
	$\mu_{11}$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\beta_2$	$\alpha\beta_{22}$	$\alpha\beta_{32}$	$\alpha\beta_{42}$	$\alpha\beta_{52}$
AN-AH 28d	6.81	NS	NS	NS	-0.35	NS	No existe interacción			
AN-AM 28d	6.85	NS				NS	NS	NS	-0.68	-0.76

Según los parámetros estadísticos obtenidos (ver Tabla 14), la sustitución del árido grueso provoca un efecto negativo significativo desde el punto de vista estadístico solo para una sustitución total. En el caso del árido fino, no se producen cambios significativos independientemente del tipo de arena empleada. En cuanto a la sustitución simultánea de ambas fracciones del árido, cuando se emplea arena reciclada mixta se produce una interferencia negativa para porcentajes de sustitución de árido grueso superiores al 75%.

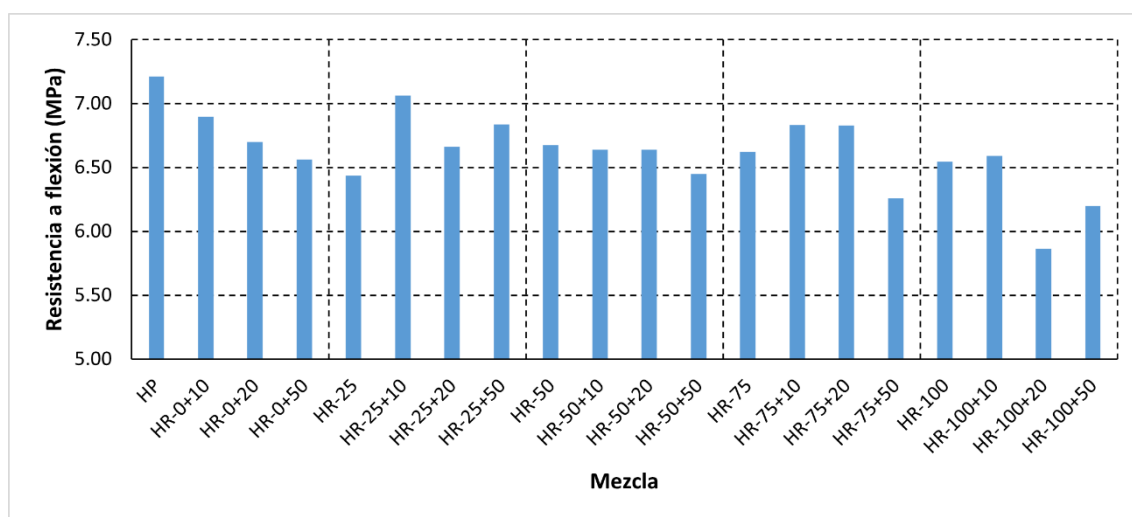
Respecto al cálculo indirecto de la resistencia a flexión por medio de la expresión de la EHE-08, indicar que se han tomado como datos de partida los resultados de resistencia media a compresión de la Figura 15. Concretamente, los valores se ajustan con un margen aproximado de un 7% si a la expresión que figura en la EHE-08 se le aplica un factor igual a 1.14, tal y como se puede observar en la Figura 21. La expresión resultante se muestra en Eq. (4).

$$f_{ct,m,fl} = (0.547 - 0.342h/1000) f_{ck}^{2/3} \quad \text{Eq. (4)}$$

### 3.5.2 Análisis estadístico de las mezclas del grupo 2

La Figura 22 muestra la resistencia a flexión a 28 días de los hormigones formulados, así como la resistencia estimada según la expresión recogida ( $f_{ct,m,fl} = 1.6 \cdot h/1000 \cdot f_{ct,m}$ ) en el punto 3.1.8 del CodE. Además, se ha estimado la resistencia a flexión a partir de la resistencia a compresión, utilizando la expresión recogida en el artículo A19.3.1.8, combinada con la expresión de resistencia media a tracción y tomando como  $f_{ck}$  un 90% de la resistencia a compresión obtenida en las probetas cúbicas. La expresión resultante se muestra en la Eq. (5).

$$f_{ct,m,fl} = 0.405 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad \text{Eq. (5)}$$



**Figura 22.** Resistencia a flexión. Análisis grupo 2.

En las mezclas que solo sustituyen la fracción gruesa del árido se han obtenido resistencias menores, con pérdidas de entre un 7.41% y un 10.73%, con valores muy similares independientemente del porcentaje de sustitución. En el caso del árido fino, la disminución de resistencia es mayor conforme aumenta la cantidad de árido reciclado, con pérdidas de entre un 4.37% y un 9.01%. En las mezclas que incorporan ambas fracciones los valores son similares excepto para mezclas con un 50% de árido fino, que presentan generalmente una pérdida de resistencia mayor, quedando sin embargo todos los valores por debajo del 20%. Estos valores son similares a los registrados por otros autores. Saini [60] y Yaba [61] encontraron pérdidas de un 4.1% y un 10% para un 50% y un 100% de sustitución de la fracción gruesa respectivamente. Respecto a la fracción fina, Mohammed [40] obtuvo una pérdida de un 14% sustituyendo un 50% del árido fino por árido reciclado.

Mohammed [40] y Xiao [62] afirman que la reducción de resistencia se produce debido a la presencia de micro fisuras en el mortero adherido en las fracciones recicladas, así como a las propiedades intrínsecas (espesor y micro elásticas) de la ITZs mortero Viejo/mortero nuevo y árido viejo/mortero viejo cuyos valores son peores que las mostradas por árido nuevo/mortero nuevo.

**Tabla 15.** Parámetros del modelo ANOVA para resistencia a flexión. Grupo 2.

Parámetro	Valor
$\mu_{11}$	7.12
$\alpha_2$	NS
$\alpha_3$	-0.42
$\alpha_4$	-0.49
$\alpha_5$	-0.66
$\beta_2$	NS
$\beta_3$	NS
$\beta_4$	-0.25
$\alpha\beta_{22}$	No existe interacción
$\alpha\beta_{32}$	
$\alpha\beta_{42}$	
$\alpha\beta_{52}$	
$\alpha\beta_{32}$	
$\alpha\beta_{33}$	
$\alpha\beta_{43}$	
$\alpha\beta_{53}$	
$\alpha\beta_{23}$	
$\alpha\beta_{33}$	
$\alpha\beta_{43}$	
$\alpha\beta_{53}$	

Desde el punto de vista estadístico (Tabla 15) el efecto de incorporar el árido grueso es negativo, con un valor no significativo para la mezcla HR-25. Respecto a las mezclas que incorporan solo la fracción fina, solo hay un factor significativo para la mezcla HR-0+50, por lo que no se advierte una tendencia clara. Asimismo, no existe interacción, por lo que la combinación de las fracciones gruesa y fina no tiene un efecto significativo en el modelo estudiado.

### 3.6 PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

La Tabla 16 recoge las profundidades media y máxima de penetración de agua bajo presión, observándose en la misma que todas las mezclas, independientemente del porcentaje y fracción reciclada incorporada, tienen unos valores de profundidad media y máxima por debajo de los límites establecidos en el artículo 43.3.2 del CodE ( $P_{med} \leq 20$  mm y  $P_{max} \leq 30$  mm) para las clases de exposición (XS3 y XA3). Por lo tanto, todos los hormigones formulados cuentan con una estructura suficientemente impermeable frente a la penetración de agua.

Tabla 16. Profundidades media y máxima de penetración de agua bajo presión

Mezcla	Profundidad media (mm)	Profundidad máxima (mm)
HP	4.45	14.54
HR-0+50	5.35	9.96
HR-25	5.25	9.09
HR-25+10	6.28	16.06
HR-25+20	5.50	12.58
HR-25+50	5.81	11.43
HR-50	9.51	14.64
HR-50+10	4.64	9.48
HR-50+20	8.27	17.94
HR-50+50	6.49	11.44
HR-75	7.83	15.02
HR-75+10	5.32	10.17
HR-75+20	7.53	14.78
HR-75+50	6.91	12.50
HR-100	6.21	12.97
HR-100+50	6.80	13.87

En primer lugar, indicar que para las mezclas que incorporan solo la fracción gruesa del árido reciclado, los valores de penetración media son mayores, presentando una alta variabilidad en los datos obtenidos, con incrementos desde un 17.99% hasta un 113.63%. Sin embargo, los valores de penetración máxima son muy similares o incluso inferiores en algunos casos. En el caso de la fracción fina solo se cuenta con la mezcla HR-0+50, que cuenta con una profundidad media un 20.15% superior a la mezcla de referencia.

En líneas generales, la variabilidad de las medidas no permite establecer una tendencia clara desde el punto de vista estadístico, si bien se puede observar una ligera tendencia ascendente conforme aumenta el contenido de árido reciclado. Analizando los parámetros del modelo (**Tabla 17**), la

sustitución de la fracción gruesa produce un efecto relativo positivo (aumenta la profundidad media) independientemente del porcentaje de sustitución. Sin embargo, para porcentajes de sustitución bajos (10%) de la fracción fina el efecto es el contrario. Respecto a las interferencias, no existe una tendencia clara desde el punto de vista estadístico, contando con escasos valores significativos.

**Tabla 17.** Parámetros del modelo ANOVA para penetración media de agua bajo presión. Grupo 2.

Parámetro	Valor
$\mu_{11}$	4.45
$\alpha_2$	NS
$\alpha_3$	5.98
$\alpha_4$	3.38
$\alpha_5$	NS
$\beta_2$	-2.51
$\beta_3$	NS
$\beta_4$	NS
$\alpha\beta_{22}$	3.54
$\alpha\beta_{32}$	-3.28
$\alpha\beta_{42}$	NS
$\alpha\beta_{52}$	NS
$\alpha\beta_{32}$	NS
$\alpha\beta_{33}$	NS
$\alpha\beta_{43}$	NS
$\alpha\beta_{53}$	NS
$\alpha\beta_{23}$	NS
$\alpha\beta_{33}$	-4.83
$\alpha\beta_{43}$	NS
$\alpha\beta_{53}$	NS
<b>Nota:</b> NS: No significativo	

En líneas generales, en la bibliografía se observa que los valores de profundidad aumentan conforme aumenta la cantidad de árido reciclado, tanto grueso como fino [63], si bien algunos autores no lo consideran significativo [64]. Zega [41] observó que los valores de penetración son ligeramente superiores en caso de utilizar la fracción fina de los áridos reciclados, si bien el

comportamiento es muy similar para porcentajes de sustitución menores del 30%. Kapoor [65] registró incrementos en la profundidad de un 30% para sustitución total de la fracción gruesa por árido de hormigón, así como incrementos de un 18% cuando se combinaban ambas fracciones (100% de la fracción gruesa y 50% de la fina). Por otro lado, Velardo [66] obtuvo valores similares de penetración media (~8 mm) y algo superiores en el caso de penetración máxima (~18 mm) utilizando áridos mixtos.

## **4 EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO**

---

### **4.1 EMISIONES DE CO<sub>2</sub>. GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP)**

La Tabla 18 muestra las emisiones CO<sub>2</sub> derivados de la producción de los componentes constituyentes del hormigón, así como el global warming potential (GWP) de las mezclas diseñados por metro cúbico de hormigón, considerando exclusivamente aquellas derivadas de la producción los materiales empleados en la fabricación de los hormigones, ignorando las emisiones derivadas del transporte que pueden variar de la localización de la planta de fabricación de hormigón y de la planta suministradora de los materiales constituyentes de los hormigones. Según Schneider [67] en un hormigón C30/37 con una composición tipo de una planta de hormigón de Alemania los kg CO<sub>2-eq</sub>/m<sup>3</sup> derivados del transporte es inferior a un 2% de las emisiones totales resultantes del proceso de fabricación, pudiendo ser despreciado tal y como indico previamente Yang et al. [68]. Asimismo, para calcular las emisiones deben de considerarse el CO<sub>2</sub> generado en el proceso de fabricación de los constituyentes del hormigón, habiendo adoptado la media de los valores encontrados en la literatura.

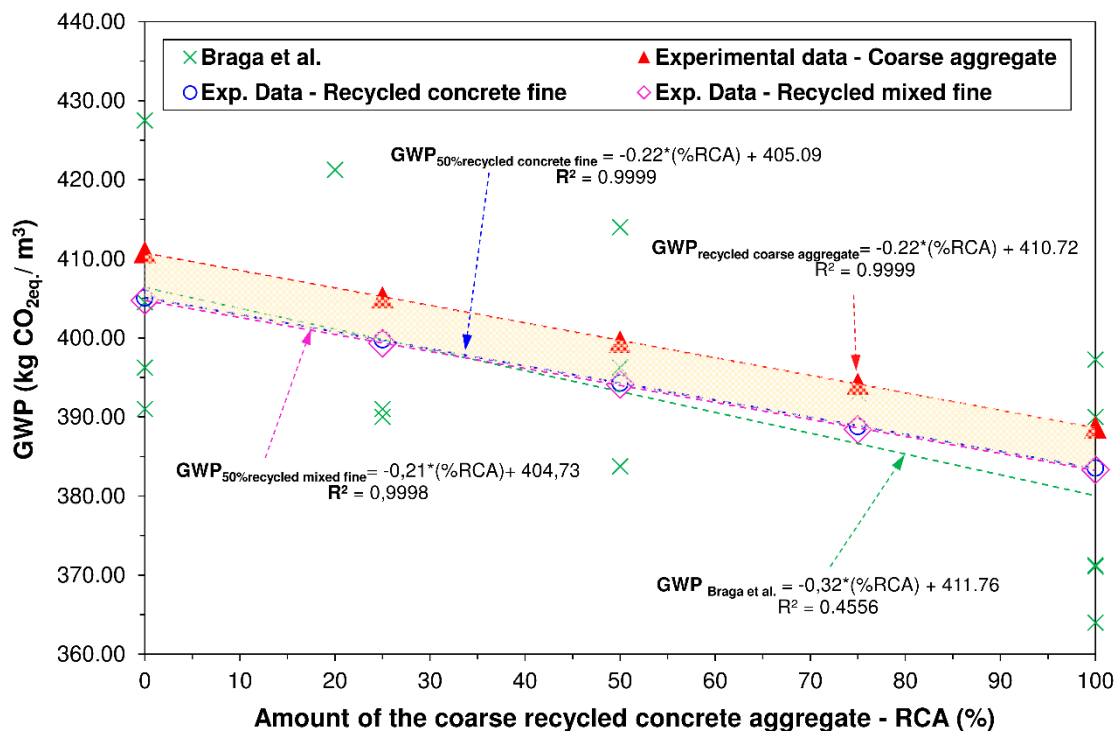
En cuanto a la contribución de cada componente, la Tabla 18 pone de manifiesto que el principal responsable de las emisiones de CO<sub>2</sub> es el cemento representando entre un 85.1% - 91.2% del total en el HP y HR-100+50M, respectivamente. Este resultado se encuentra en consonancia con lo indicado previamente por Alnahhal et al. [69] y Jiménez et al. [70] que obtuvieron unos valores entre 84.4%-87.1% y 88.8% - 91.1% en un hormigón convencional y un hormigón con un 100% de árido grueso reciclado de hormigón, respectivamente. Asimismo, se observa al igual que otros autores [69, 70] que en los hormigones reciclados tiene un mayor peso en las emisiones totales de CO<sub>2</sub> el cemento que en los hormigones convencionales.

**Tabla 18.** Emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación de los materiales y de las mezclas de hormigón por m<sup>3</sup>

Materiales/ Referencias/ Mezcla	GWP (kg CO <sub>2eq</sub> / kg)								
	AN	AH/ AM	gN	GN	gH	GH	Cemento	Agua	
Materiales	0.025	0.012	0.038		0.020		0.8735	0.00013 3	
Referencias	[69, 71, 72]	[72]	[49, 69, 71, 72]		[49, 69, 71, 72]		[69, 71]	[71]	
Mezcla	GWP (kg CO <sub>2eq</sub> / m <sup>3</sup> )								
	AN	AH/ AM	gN	GN	gH	GH	Cemento	Agua	Total
HP	18.26	0.00	43.14	0.00	349.40	0.03	18.26	0.00	410.83
HR-25	18.07	0.00	32.01	5.62	349.40	0.03	18.07	0.00	405.13
HR-50	17.88	0.00	21.12	11.12	349.40	0.03	17.88	0.00	399.54
HR-75	17.73	0.00	10.47	16.54	349.40	0.03	17.73	0.00	394.18
HR-100	17.49	0.00	0.00	21.76	349.40	0.03	17.49	0.00	388.68
HR-0+50	8.99	4.19	42.46	0.00	349.40	0.03	8.99	4.19	405.06
HR-25+50	8.94	4.17	31.67	5.56	349.40	0.03	8.94	4.17	399.77
HR-50+50	8.84	4.12	20.89	11.00	349.40	0.03	8.84	4.12	394.28
HR-75+50	8.72	4.07	10.30	16.27	349.40	0.03	8.72	4.07	388.80
HR-100+50	8.63	4.02	0.00	21.46	349.40	0.03	8.63	4.02	383.54
HR-0+50M	8.94	4.13	42.23	0.00	349.40	0.03	8.94	4.13	404.73
HR-25+50M	8.87	4.10	31.42	5.51	349.40	0.03	8.87	4.10	399.32
HR-50+50M	8.82	4.07	20.83	10.97	349.40	0.03	8.82	4.07	394.12
HR-75+50M	8.65	4.00	10.22	16.14	349.40	0.03	8.65	4.00	388.43
HR-100+50M	8.58	3.96	0.00	21.34	349.40	0.03	8.58	3.96	383.81

La Figura 23 muestra la evolución de GWP con el contenido de árido grueso reciclado de hormigón (RCA) obtenido en el presente trabajo de investigación, así como los datos recopilados por Braga et al. [71] para hormigones con un contenido de cemento mayor e igual a 400 kg/m<sup>3</sup> y clase C30/37. Asimismo, se representa también la evolución de GWP en las muestras con un 50% de AH y AM y distinto porcentaje de RCA. En la misma, se observa que independientemente del

porcentaje y fracción granulométrica reciclada incorporada se produce un descenso de GWP en todos los hormigones reciclados, situándose éste entre un ~1.4% - 6.7% respecto al HP. Asimismo, se pone de manifiesto que los valores obtenidos se encuentran en consonancia con los hormigones de tipología similar existente en la literatura.



**Figura 23.** Global warming potential (GWP) por metro cúbico de hormigón en función del porcentaje de sustitución de árido grueso reciclado de hormigón

En cuanto al efecto de la incorporación de RCA, se observa un descenso lineal en la GWP a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, provocando una disminución en el HR-25 y HR-50 de 1.4% y 5.4% respecto al HP. Adicionalmente, este descenso es mayor en los hormigones que incorporan simultáneamente la fracción gruesa y fina como parte de su esqueleto granular, observando la contribución positiva que tiene la fracción fina reciclada (véase área sombreada de la figura) en las emisiones. Asimismo, los descensos experimentados son similares (~7%) respecto a los hormigones convencionales) a los reportados previamente por Gursel et al. [73] y Alnahhal et al. [69] y superiores (~2%) a los obtenidos por Hanif et al. [74] en hormigones con árido reciclado. Esta observación, se encuentra de acuerdo con los indicado por Visintin et al. [75] que indicaban que para hormigones con una resistencia a compresión menor de 45 MPa la reducción de las emisiones ocurre debido a la sustitución de árido natural por árido reciclado.

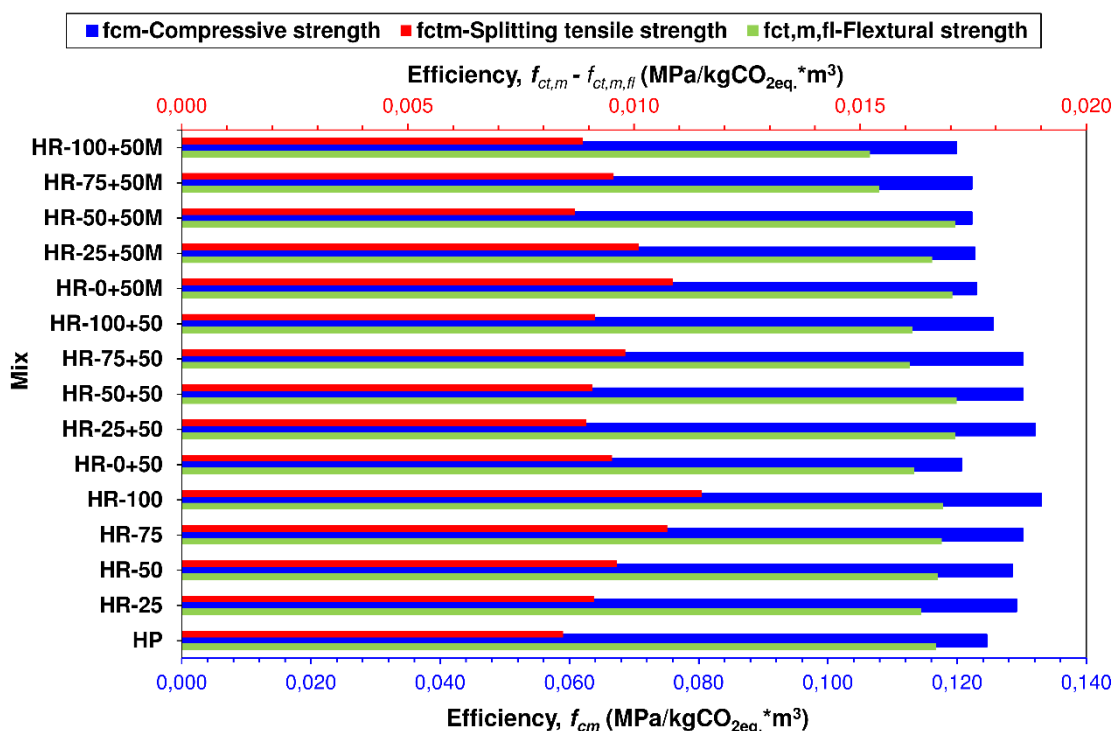
En este contexto, destacar que a pesar de esta baja contribución en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> el beneficio del uso de los áridos reciclados reside también en la conservación de los recursos naturales, reducción de los impactos medioambientales derivados de su vertido y la reincorporación de los mismos nuevamente al ciclo de los materiales.



Finalmente, en la Figura 23 se observa claramente la relación lineal entre GWP y porcentaje de RCA con un  $R^2 \sim 1$ . Este  $R^2$  es mayor que el obtenido por Braga et al. [71] debido a que estos autores obtuvieron dicha correlación para hormigones con una misma clase C30/37 pero distinta composición (contenido de cemento variable ...).

## 4.2 ECO-EFICIENCIA RESISTENTE

La Figura 24 muestra la eficiencia de todas las mezclas de hormigón definido como la ratio de la resistencia y las emisiones de  $\text{CO}_2\text{-eq.}$  (GWH) a los 28 días. Este parámetro, es la inversa de la intensidad de  $\text{CO}_2$  ( $\text{kgCO}_2\text{eq./MPa}\cdot\text{m}^3$ ) que permite relacionar el comportamiento ecológico y el comportamiento técnico de los hormigones [76]. En la misma, se observa que las mezclas que incorporan de forma independiente arena mixta o de forma simultánea con el árido grueso reciclado tienen una peor eficiencia respecto al HP, desde un punto de vista de resistencia a compresión, experimentando un descenso entre el 1.2% - 3.8% para la mezcla HR-0+50M y HR-100+50M, respectivamente. Este resultado, es debido a la mínima contribución que tienen los áridos reciclados en las emisiones totales de  $\text{CO}_2$ , unido con su efecto negativo en la resistencia a compresión.



**Figura 24.** Eficiencia de los hormigones con respecto a la resistencia (compresión –  $f_{cm}$ , tracción –  $f_{ctm}$  y flexión –  $f_{ct,m,fl}$ ) y emisiones  $\text{CO}_2$

Asimismo, estos hormigones diseñados con árido mixto y/o árido reciclado de hormigón tienen una eficiencia mayor en la resistencia a tracción que el HP y en el caso de la resistencia a flexión es igual o mejor para porcentajes de árido grueso de hormigón igual e inferior a un 50% y arena

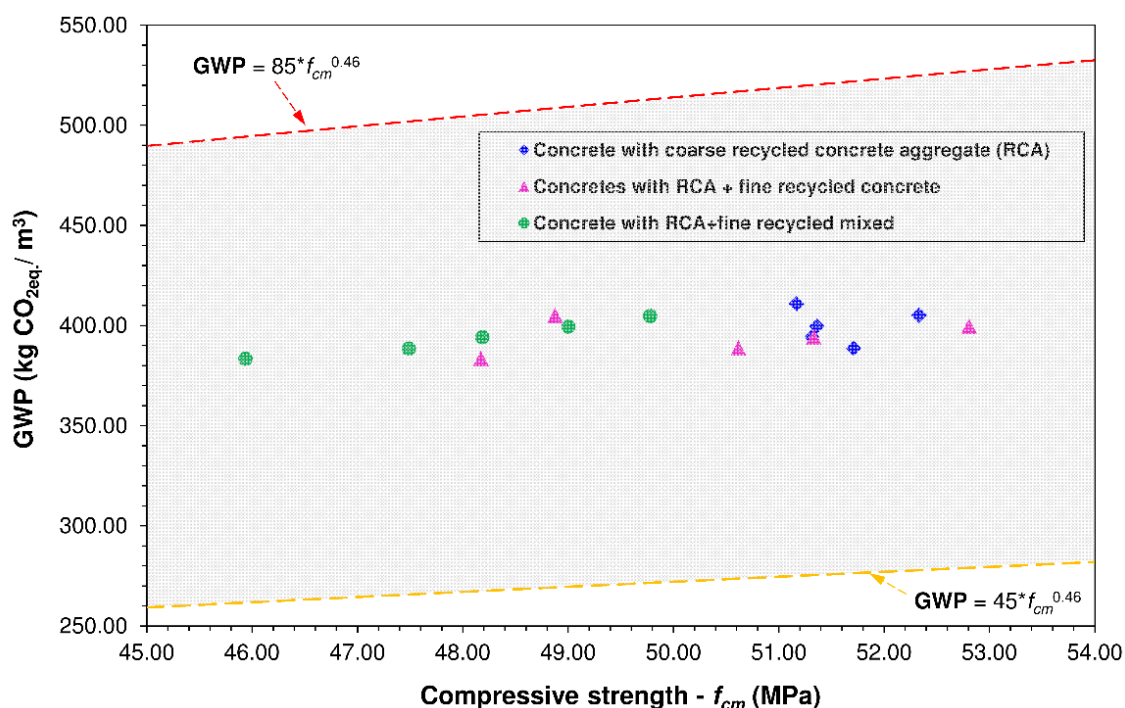
## Capítulo 4. Resultados

mixta en un 50%. Este comportamiento, se encuentra en consonancia con los expuesto por Alnahhal et al. [69] que indican que el efecto medioambiental que tiene la incorporación de los áridos reciclados no es capaz en algunas ocasiones de contrarrestar el efecto negativo que tiene su incorporación en las prestaciones mecánicas.

Respecto a las mezclas que incorporan únicamente árido grueso reciclado o arena reciclada de hormigón (AH) y simultáneamente ambas fracciones recicladas, destacar que la incorporación de las mismas provoca mayoritariamente un incremento en la eficiencia ( $\text{MPa}/\text{kg CO}_{2\text{eq.}} \cdot \text{m}^3$ ) para las diferentes prestaciones mecánicas analizadas, excepto en el caso la mezcla HR-0+50 en compresión ( $\Delta \sim -3.1\%$  respecto al HP) y en flexión las mezclas HR-0+50, HR-75+50 y HR-100+50 con descensos de  $\sim 3\%$  respecto al HP. Esta mayor eficiencia de los nuevos hormigones reciclado pone de manifiesto que la incorporación del nuevo esqueleto granular tiene efecto positivo desde un punto de vista medioambiental como prestacional.

Los valores obtenidos para la eficiencia ( $f_{cm}$  (MPa)/ $\text{kg CO}_{2\text{eq.}} \cdot \text{m}^3$ ) es similar con el valor de  $0.123 \text{ MPa}/\text{kg CO}_{2\text{eq.}} \cdot \text{m}^3$  y mayor de  $0.112 \text{ MPa}/\text{kg CO}_{2\text{eq.}} \cdot \text{m}^3$  obtenido por Alnahhal et al. [69] para hormigones convencionales con una  $f_{ck}=30 \text{ MPa}$ ,  $w/c_{\text{efectiva}} = 0.55$ , contenido en cemento de  $380 \text{ kg}/\text{m}^3$  y reciclados con un 100% de árido reciclado grueso de hormigón, respectivamente.

La Figura 25 muestra la relación entre el GWP y la resistencia a compresión de los hormigones experimentados, al mismo tiempo que se representa la función de regresión potencial (Eq. (6)) para un intervalo de confianza del 95% en el límite superior e inferior, donde el valor del factor es igual a 85 y 45 [77].



**Figura 25.** Relación entre el GWP y  $f_{cm}$  de los hormigones reciclados

$$GWP = \text{factor} * f_{cm}^{0.46} \quad \text{Eq. (6)}$$

Asimismo, a partir de la Figura 25 no se puede deducir claramente una relación clara entre GWP y  $f_{cm}$ , lo que significa que la incorporación de los áridos reciclados gruesos y finos afectan de forma diferente a las características del hormigón. Este hecho también fue reportado previamente por Kurda et al. [77] que realizó un análisis de la relación entre estas dos propiedades basándose en los datos existentes en la literatura.

Finalmente, indicar que los datos experimentales obtenidos se encuentran dentro del área delimitada por el límite superior e inferior, al igual que sucede para otros hormigones que incorporan árido reciclado [77].

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. European Committee for Standardization, *EN 206:2013+A1:2018. Concrete. Specification, performance, production and conformity*. 2018. p. 135.
2. Standardization, E.C.f., *EN 12620:2003+A1:2009. Aggregates for concrete*. 2009. p. 60.
3. Pedro, D., J. de Brito, and L. Evangelista, *Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete*. Construction and Building Materials, 2014. **71**: p. 141-151.
4. Zhao, Z., S. Remond, D. Damidot, and W. Xu, *Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars*. Construction and Building Materials, 2015. **81**: p. 179-186.
5. Wagih, A.M., H.Z. El-Karmoty, M. Ebid, and S.H. Okba, *Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete*. HBRC journal, 2013. **9**(3): p. 193-200.
6. Kenai, S., F. Debieb, and L. Azzouz. *Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates*. in *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9–11 September 2002*. 2002. Thomas Telford Publishing.
7. Lovato, P.S., et al., *Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes*. Construction and Building Materials, 2012. **26**(1): p. 437-447.
8. Khatib, J.M., *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. Cement and concrete research, 2005. **35**(4): p. 763-769.

9. Corinaldesi, V. and G. Moriconi, *Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(8): p. 2869-2876.
10. Bravo, M., J. de Brito, J. Pontes, and L. Evangelista, *Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants*. Journal of Cleaner Production, 2015. **99**: p. 59-74.
11. Pedro, D., J. de Brito, and L. Evangelista, *Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties*. Construction and Building Materials, 2017. **154**: p. 294-309.
12. Mefteh, H., et al., *Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete*. Journal of Cleaner Production, 2013. **54**: p. 282-288.
13. Spanish Committee for Standardization, *UNE 146508:2018. Test for aggregates. Determination of the alkali-silica and alkali-silicate potencial reactivity of aggregates. Accelerated mortar bar test*. 2018, UNE: Madrid. p. 12.
14. Peng, Z., et al., *Alkali-aggregate reaction in recycled aggregate concrete*. Journal of Cleaner Production, 2020. **255**: p. 120238.
15. Xiao, J.Z., J.B. Li, and C. Zhang, *Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading*. Cement and Concrete Research, 2005. **35**(6): p. 1187-1194.
16. Saez del Bosque, I.F., et al., *Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate*. Cement & Concrete Composites, 2017. **81**: p. 25-34.
17. Medina, C., et al., *Influence of interfacial transition zone on engineering properties of the concrete manufactured with recycled ceramic aggregate*. Journal of Civil Engineering and Management, 2015. **21**(1): p. 83-93.
18. Cantero, B., I.F. Saez del Bosque, A. Matias, and C. Medina, *Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of structural concretes*. Construction and Building Materials, 2018. **185**: p. 93-101.
19. Yaprak, H., et al., *Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties*. International Journal of Physical Sciences, 2011. **6**(10): p. 2455-2461.
20. Şimşek, O., H. Pourghadri Sefidehkhani, and H.S. Gökçe, *Performance of fly ash-blended Portland cement concrete developed by using fine or coarse recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, 2022. **357**: p. 129431.
21. Dimitriou, G., P. Savva, and M.F. Petrou, *Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2018. **158**: p. 228-235.

22. Tuyan, M., A. Mardani-Aghabaglou, and K. Ramyar, *Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate*. *Materials & Design*, 2014. **53**: p. 983-991.
23. Soutsos, M.N., *Concrete durability : a practical guide to the design of durable concrete structures*. 2010, London: Thomas Telford. xiv, 585 p.
24. Gomez, J.M., L. Agullo, and E. Vazquez, *Relationship between porosity and concrete properties with natural aggregate replacement by recycled concrete aggregate*. 2001 Second International Conference on Engineering Materials, Vol I, ed. S. Nagataki, A. AlManaseer, and K. Sakata. 2001, Montreal: Canadian Society Civil Engineering. 147-156.
25. Kou, S.-C., C.-S. Poon, and M. Etxeberria, *Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 2011. **33**(2): p. 286-291.
26. Gómez-Soberón, J.M.V., *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study*. *Cement and Concrete Research*, 2002. **32**(8): p. 1301-1311.
27. Zaharieva, R., F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, and E. Wirquin, *Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete*. *Cement & Concrete Composites*, 2003. **25**(2): p. 223-232.
28. Saez del Bosque, I.F., et al., *Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate*. *Cement and Concrete Composites*, 2017. **81**: p. 25-34.
29. Lotfy, A. and M. Al-Fayez, *Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate*. *Cement and concrete composites*, 2015. **61**: p. 36-43.
30. Kumar Metha, P. and P.J.M. Monteiro, *CONCRETE: Microstructure, Properties and Materials*. Third Edition ed. 2006, United States of America: McGraw-Hill. 659.
31. Rahal, K., *Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*. *Building and Environment*, 2007. **42**(1): p. 407-415.
32. Wang, Y., et al., *Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate*. *Construction and Building Materials*, 2019. **215**: p. 332-346.
33. Zhang, H., Y.-Y. Wang, D.E. Lehman, and Y. Geng, *Autogenous-shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate*. *Cement and Concrete Composites*, 2020: p. 103600.

34. Velay-Lizancos, M., et al., *Concrete with fine and coarse recycled aggregates: E-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages*. Construction and Building Materials, 2018. **193**: p. 323-331.
35. Puente de Andrade, G., G. de Castro Polisseni, M. Pepe, and R.D. Toledo Filho, *Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model*. Construction and Building Materials, 2020. **252**: p. 119091.
36. Fan, C.-C., R. Huang, H. Hwang, and S.-J. Chao, *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes*. Construction and Building Materials, 2016. **112**: p. 708-715.
37. Khoshkenari, A.G., P. Shafigh, M. Moghimi, and H. Bin Mahmud, *The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete*. Materials & Design, 2014. **64**: p. 345-354.
38. Guo, Z., et al., *Mechanical and durability behaviours of concrete made with recycled coarse and fine aggregates*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020. **24**(2): p. 171-189.
39. Chang, Y.-C., et al., *Different influence of replacement ratio of recycled aggregate on uniaxial stress-strain relationship for recycled concrete with different concrete strengths*. Structures, 2022. **42**: p. 284-308.
40. Mohammed, S.I. and K.B. Najim, *Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete*. Structures, 2020. **23**: p. 34-43.
41. Zega, C.J. and Á.A. Di Maio, *Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements*. Waste Management, 2011. **31**(11): p. 2336-2340.
42. Surendar, M., et al., *Mechanical properties of concrete with recycled aggregate and M-sand*. Materials Today: Proceedings, 2021. **44**: p. 1723-1730.
43. Etxeberria, M., E. Vazquez, A. Mari, and M. Barra, *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, 2007. **37**(5): p. 735-742.
44. Kou, S.C. and C.S. Poon, *Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates*. Cement & Concrete Composites, 2009. **31**(9): p. 622-627.
45. Salahuddin, H., L.A. Qureshi, A. Nawaz, and S.S. Raza, *Effect of recycled fine aggregates on performance of Reactive Powder Concrete*. Construction and Building Materials, 2020. **243**: p. 118223.
46. Evangelista, L. and J. de Brito, *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(5): p. 397-401.

47. Ajdukiewicz, A. and A. Kliszczewicz, *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC*. Cement & Concrete Composites, 2002. **24**(2): p. 269-279.
48. Ahmed, S., *Properties of concrete containing recycled fine aggregate and fly ash*. The Journal of Solid Waste Technology and Management, 2014. **40**(1): p. 70-78.
49. Kirthika, S.K., S.K. Singh, and A. Chourasia, *Performance of Recycled Fine-Aggregate Concrete Using Novel Mix-Proportioning Method*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020. **32**(8): p. 04020216.
50. Li, X., *Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 2008. **53**(1-2): p. 36-44.
51. Xiao, J.-Z., J.-B. Li, and C. Zhang, *On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview*. Materials and structures, 2006. **39**(6): p. 655-664.
52. Katz, A., *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and concrete research, 2003. **33**(5): p. 703-711.
53. Committee, A. and I.O.f. Standardization. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*. 2008. American Concrete Institute.
54. Silva, R.V., J. de Brito, and R.K. Dhir, *Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2015. **83**: p. 108-118.
55. González-Fonteboa, B., et al., *Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis*. Materiales de construcción, 2018. **68**(330): p. 151.
56. Senthamarai, R., P.D. Manoharan, and D. Gobinath, *Concrete made from ceramic industry waste: durability properties*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(5): p. 2413-2419.
57. Malešev, M., V. Radonjanin, and S. Marinković, *Recycled concrete as aggregate for structural concrete production*. Sustainability, 2010. **2**(5): p. 1204-1225.
58. Topcu, I.B. and S. Şengel, *Properties of concretes produced with waste concrete aggregate*. Cement and concrete research, 2004. **34**(8): p. 1307-1312.
59. Kumar, R., S.C.B. Gurram, and A.K. Minocha, *Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete*. Magazine of Concrete Research, 2017. **69**(24): p. 1288-1295.
60. Saini, B.S. and S.P. Singh, *Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements*. Construction and Building Materials, 2020. **264**: p. 120233.
61. Yaba, H.K., H.S. Naji, K.H. Younis, and T.K. Ibrahim, *Compressive and flexural strengths of recycled aggregate concrete: Effect of different contents of metakaolin*. Materials Today: Proceedings, 2021. **45**: p. 4719-4723.

62. Xiao, J., et al., *Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete*. Journal of Cleaner Production, 2022. **366**: p. 132895.
63. Thomas, C., J. Setien, and J.A. Polanco, *Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes*. Construction and Building Materials, 2016. **114**: p. 536-546.
64. Faella, C., et al., *Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study*. Cement and Concrete Composites, 2016. **71**: p. 85-96.
65. Kapoor, K., S.P. Singh, and B. Singh, *Water Permeation Properties of Self Compacting Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates*. International Journal of Civil Engineering, 2018. **16**(1): p. 47-56.
66. Velardo, P., et al., *Durability of concrete bearing polymer-treated mixed recycled aggregate*. Construction and Building Materials, 2022. **315**: p. 125781.
67. Schneider, M., *The cement industry on the way to a low-carbon future*. Cement and Concrete Research, 2019. **124**: p. 105792.
68. Yang, K.-H., Y.-B. Jung, M.-S. Cho, and S.-H. Tae, *Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete*. Journal of Cleaner Production, 2015. **103**: p. 774-783.
69. Alnahhal, M.F., et al., *Assessment on engineering properties and CO2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement*. Journal of Cleaner Production, 2018. **203**: p. 822-835.
70. Jiménez, L.F., J.A. Domínguez, and R.E. Vega-Azamar, *Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete*. Advances in Civil Engineering, 2018. **2018**: p. 7949741.
71. Braga, A.M., J.D. Silvestre, and J. de Brito, *Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates*. Journal of Cleaner Production, 2017. **162**: p. 529-543.
72. Hossain, M.U., C.S. Poon, I.M.C. Lo, and J.C.P. Cheng, *Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA*. Resources, Conservation and Recycling, 2016. **109**: p. 67-77.
73. Gursel, A.P., H. Maryman, and C. Ostertag, *A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of "green" concrete mixes with rice husk ash*. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 823-836.
74. Hanif, A., Y. Kim, Z. Lu, and C. Park, *Early-age behavior of recycled aggregate concrete under steam curing regime*. Journal of Cleaner Production, 2017. **152**: p. 103-114.
75. Visintin, P., T. Xie, and B. Bennett, *A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake*. Journal of Cleaner Production, 2020. **248**: p. 119243.



76. Müller, H.S., M. Haist, and M. Vogel, *Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime*. Construction and Building Materials, 2014. **67**: p. 321-337.
77. Kurda, R., J. de Brito, and J.D. Silvestre, *A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete*. Journal of Building Engineering, 2020. **29**: p. 101173.



# Capítulo 5. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo se exponen a continuación:

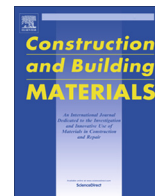
- Los áridos reciclados tienen una mayor absorción, así como una menor resistencia a la fragmentación, densidad e índice de lajas que los áridos naturales.
- Las fracciones recicladas gruesas (grava y gravilla) y fina (arena) cumplen con los requisitos mecánicos, físicos y químicos recogidos en la normativa vigente de áridos para hormigones.
- La trabajabilidad de los hormigones reciclados no se ve afectada por la incorporación de árido reciclado independientemente de su naturaleza y % de sustitución, presentando todas las mezclas una consistencia blanda.
- La densidad de los hormigones con árido reciclado es inferior a la de la mezcla de control en todos los casos, tanto en estado fresco como en estado endurecido. La densidad disminuye conforme aumenta la proporción de árido reciclado en la mezcla, registrando variaciones de densidad inferiores al 5% en todos los casos.
- La incorporación de pequeños porcentajes de árido grueso de hormigón (<25%) solo o con arena reciclada de hormigón provoca una disminución de la porosidad total y un refinamiento del sistema poroso. Para el resto de escenarios se produce un pequeño aumento de estas propiedades.
- El contenido de aire ocluido aumenta ligeramente conforme aumenta la cantidad de árido reciclado, manteniéndose sin embargo dentro de los valores habituales para hormigón armado convencional, no llegando a sobrepasar el 1.9% en las mezclas con mayor contenido de árido reciclado.
- La resistencia a compresión de los hormigones con árido reciclado es menor que la de la mezcla de referencia, con pérdidas inferiores al 17% en todos los casos. Las mayores pérdidas se registran en las mezclas que incluyen un mayor porcentaje (50%) de árido reciclado fino.
- La resistencia a tracción indirecta aumenta conforme aumenta el porcentaje de sustitución del árido grueso, presentando pérdidas relativas cuando se incorpora el árido fino. Sin embargo, todos los valores son prácticamente iguales o superiores al valor de referencia, alcanzando incrementos de resistencia de hasta un 10%.
- El comportamiento a flexión es similar al registrado en compresión, aumentando ligeramente el porcentaje máximo de pérdidas hasta el 19%. Las pérdidas son generalmente mayores en las mezclas que incluyen un alto porcentaje de árido reciclado, tanto grueso como fino.
- Todas las mezclas son adecuadas a priori para su uso en hormigón estructural clase C30/37.

## Capítulo 5. Conclusiones

- La expresión recogida en el código estructural para la estimación de la resistencia a flexión es correcta, mostrando valores con diferencias inferiores al 10% respecto a los valores experimentales para todas las mezclas.
- La expresión matemática propuesta por el Código Estructural permite predecir la resistencia a tracción indirecta a partir de la resistencia a compresión a 28 días debe ser corregida.
- Las profundidades de penetración de agua bajo presión presentan gran variabilidad, con incrementos de hasta un 100%. Sin embargo, en todos los casos se cumple lo establecido en la normativa.
- La incorporación de los áridos reciclados provoca un descenso lineal de GWP, situándose este para el HR-25 y HR-100+50M entre un 1.4% y 6.7% respecto a las emisiones totales del HP, respectivamente.
- La sustitución parcial de árido natural por árido reciclado de hormigón o de forma simultánea con FRC tiene mayoritariamente un efecto positivo en la eco-eficiencia resistente (resistencia a compresión, tracción y flexión con respecto a las emisiones CO<sub>2</sub>) con unos valores similares o mayores al HP. En cuanto a las mezclas con árido grueso reciclado de hormigón y FRM, se observa un efecto positivo en la eco-eficiencia resistente (resistencia a tracción con respecto a las emisiones CO<sub>2</sub>) mientras que para las otras dos propiedades mecánicas es ligeramente inferior con descensos <3% respecto al HP.
- Los beneficios del uso de los áridos reciclados como árido grueso (gRC y GRC) y/o fino (FRC o FRM) como sustituto parcial de los áridos naturales no solamente reside en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de producción de un hormigón, sino que también minimizan significativamente los problemas medioambientales causados del vertido de estos materiales.
- La intensidad de recursos naturales (agua + áridos) utilizadas en los hormigones reciclados disminuye, siendo estos materiales más respetuosos con el medio ambiente.

# Capítulo 6. Publicaciones





# Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO<sub>2</sub> emissions



P. Plaza<sup>a,\*</sup>, I.F. Sáez del Bosque<sup>a</sup>, M. Frías<sup>b,c</sup>, M.I. Sánchez de Rojas<sup>b,c</sup>, C. Medina<sup>a,c,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Construction, School of Engineering, University of Extremadura, Institute for Sustainable Regional Development (INTERRA), 10003 - Cáceres, Spain

<sup>b</sup> Materials Recycling Department, Eduardo Torroja Institute for Construction Science, Spanish National Research Council (CSIC), 28033 - Madrid, Spain

<sup>c</sup> SOSMAT, University of Extremadura, CSIC Partnering Unit, Spain

## HIGHLIGHTS

- Recycled concrete and mixed aggregates are apt for structural concrete.
- Recycled aggregates have no effect on concrete workability.
- All the aggregates studied can be used to manufacture 30 MPa concretes.
- EHE-08 models for predicting tensile and flexural strength should be corrected.
- The use of recycled aggregates lowers CO<sub>2</sub> emissions.

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 5 August 2020

Received in revised form 21 January 2021

Accepted 26 February 2021

### Keywords:

Coarse and fine recycled aggregates  
Fresh state concrete properties  
global warming potential (GWP)  
Concrete mechanical performance

## ABSTRACT

This study analysed the effect of simultaneously replacing 0% to 100% natural with recycled concrete coarse aggregate and natural fines with 50% recycled concrete or mixed CDW fines. Characterisation of these new secondary raw materials is followed by an analysis of the effect of their use on the fresh and hardened state properties of the resulting eco-concretes. The implications for the mechanical requirements laid down in the existing legislation are determined and proposals put forward for new expressions for calculating splitting tensile and flexural strength. The CO<sub>2</sub> emitted (global warming potential, GWP) by the new formulations is also explored and eco-efficiency, defined as the ratio between strength and CO<sub>2</sub> emissions, is assessed. The findings show declines of no >17% in compressive and tensile strength with these new aggregates and in flexural strength of <15%. Emissions analysis reveals that eco-efficiency is enhanced with the separate or joint use of recycled coarse and fine aggregates, due to the CO<sub>2</sub> emissions abatement ensuing.

© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Managing the waste generated by human activity is a worldwide challenge. According to Eurostat [1], in 2016 around 2535 Mt of waste was generated in the EU as a whole, 36.44% of which (~92.4 Mt) attributable to the construction industry. The enormous impact of such vast amounts of waste has driven the institution of any number of EU-wide sustainable development policies geared

to tackling climate change, including the Strategy for smart, sustainable and inclusive growth [2], the Paris Protocol [3] and the Next steps for a sustainable European future [4]. Those guidelines are designed to encourage a change in production procedures to embrace a circular, more sustainable and eco-respectful model in which waste is re-introduced into production processes, reducing raw material over-exploitation and maximising material life cycles.

In light of its intrinsic properties, such as the wide variety of end products and high raw material demands, construction is one of the most promising industries for valorising waste generated both by the sector itself and others. According to European Aggregates Association (UEPG) data, in 2018 [5] the industry's yearly demand for aggregate came to 3·10<sup>9</sup> t, over 84% of which was mined from natural quarries or gravel beds. Around 45% of the total was used

*Abbreviations:* CDW, construction and demolition waste; RCA, recycled concrete aggregate; MRA, mixed recycled aggregate; NA, natural aggregate; RF, recycled fine aggregate; CS-F, finely crushed stone; CS-M, medially crushed stone; CS-C, coarsely crushed stone; RCF, recycled concrete sand; RMF, recycled mixed sand; RCG, recycled concrete gravel; RCC, recycled crushed concrete.

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [pablopc@unex.es](mailto:pablopc@unex.es) (P. Plaza), [cmedinam@unex.es](mailto:cmedinam@unex.es) (C. Medina).

to manufacture ready-mix (~25%), precast (~25%) or architectural (~5%) concrete.

The concrete sub-industry's environmental footprint could be reduced with a view to contributing to a circular economy by lowering raw material consumption and CO<sub>2</sub> emissions [6]. That, in turn, would entail the use of secondary raw materials from construction and demolition waste (CDW), either as recycled aggregate [7,8] or as components in new cements [9–11]. Alnahhal et al. [12], for instance, contend that wholly replacing crushed granite with recycled coarse aggregate would lower CO<sub>2</sub> emissions by 7%.

In that vein, much research has focused on assessing the properties of coarse recycled aggregate (CRA) processed by crushing concrete waste and the effect of replacing 5% to 100% of the natural materials with such waste on the fresh and hardened state properties of new recycled concretes. Silva et al. [13] and Fonteboia et al. [14], in bibliographic reviews of the scientific community's findings, drew the following conclusions: i) mechanical performance, especially compressive and tensile strength, depends on the recycled aggregate content, concrete manufacturing procedures, type of recycled aggregate used (concrete, mixed or masonry), fraction and origin; ii) compressive strength is not significantly affected (declines of 10% relative to conventional concretes) at replacement ratios by 30% coarse and 20% fine aggregates; iii) tensile strength is impacted less than compressive strength, for it declines by just 5% to 15% at 50% replacement of coarse aggregate and up to 35% when 50% of fines are replaced. Silva et al. [13] also observed that mechanical strength slid more when recycled masonry (RMA) or mixed recycled (MRA) aggregates were used, falling by around 40% when the coarse aggregate replacement ratio was > 50%, with the steepest drops recorded for RMA. Where RMA was used to replace fines, however, due to the pozzolanicity of that finer fraction (<90 μm), the decline was shallower, with dips of 10% to 30% relative to conventional concrete at 100% replacement of natural aggregate.

The general consensus found in the literature is that the loss of performance due to the < 30% replacement of NA with RCA could be offset by raising the cement content when batching recycled concretes. That is not the most recommendable strategy, however, for raising cement content would increase the cost/m<sup>3</sup> of the end product [15] as well as its environmental footprint, as cement accounts for 85.6% of concrete-mediated CO<sub>2</sub> emissions [16]. According to Visintin et al. [17], increasing the cement content to compensate for larger proportions of recycled aggregate would entail 1.5- to 3-fold higher CO<sub>2eq.</sub> emissions than in conventional concrete.

As a result of the research conducted to date, some countries have enacted legislation limiting the use of recycled, primarily crushed concrete, aggregate (RCA), in concrete manufacture. Table 1 summarises the most prominent legislation in place on the use of RCA, listing particle size allowed and maximum replacement ratio for a given strength class. The table includes recycled concrete aggregate (shaded cells) whose composition (5% ≤ Rb-masonry waste ≤ 30%) determines its classification as mixed recycled aggregate in some international standards.

Further to Table 1, the common denominator in all the design regulations for concretes in strength classes C25/30 to C40/50 is the stipulation of a ceiling on the amount of natural coarse aggregate that can be replaced by RCA (15% to 60%, depending on quality, design strength of the structural reinforced concrete and exposure class). Total replacement of NA with high quality RCA is allowed only in Australia, China, Denmark, Switzerland and RILEM recommendations. Whereas total replacement of NA is subject to no concrete strength class limitations in China or Switzerland, in Australia it is limited to class C25/30, in Denmark to class C40/50 and under the RILEM provisions to class C50/60. The use of clean

recycled RCA sand from concrete crushing operations for structural concrete manufacture, in turn, is addressed in the legislation in place only in China (30% to 100% of natural aggregate), Denmark (100%), Korea (30%), Japan (100%) and United Kingdom (20%). RCA of lower quality or deemed MRA on the grounds of composition can be used as a 100% replacement in structural concretes with a design compressive strength of C25/30 in Australia, whereas in Germany replacement is limited to 35% in C35/45 and in Portugal to 20% in C30/37 concretes. In all other countries, its use is restricted to non-structural concretes. Briefly, then, most countries limit the use of recycled aggregate to the coarse fraction only and at replacement ratios of 20% to 30% whilst the use of medium-to-high quality recycled fines in structural concrete, in turn, is addressed in only 22% of the standards presently in place.

Those limitations call for urgent pursuit by the research community of in-depth knowledge of the viability of using the fines resulting from concrete crushing, separately or in conjunction with the coarse fraction. Such research would determine the viability of valorising the former, which accounts for 25% to 50% of the volume of recycled aggregate generated at CDW management plants, normally as a by-product buried as waste [20], despite its role in the life cycle of concrete structures, a key notion in the context of the circular economy.

The viability of using RCA fines (RFA<sub>R</sub>) in the granular skeleton of conventional concretes has been studied by a number of researchers, who reported an increase in water and superplasticiser demand to maintain the workability attained with natural river sand, due primarily to the dust and mortar adhered to the RFA<sub>R</sub> surface [21]. The effect of such use on mechanical properties has been observed to vary. i) At replacement of up to 50%, compressive strength rose by 13.7% [22], was similar to (~+5%) [23] or declined slightly (<8%) [23,24] relative to the reference. ii) At up to 70% [25] or even 100% [20], both compressive and tensile strength were found to be similar to or slightly greater than in conventional concretes. iii) The use of RFA<sub>R</sub> induced a gradual decline in bearing capacity [26] of up to ~5% for ratios of 25% and ~35% for replacement of 100% [27]. Despite such discrepancies, the conclusion to be drawn from the literature is that for replacement ratios of under 30%, new concrete performance is comparable to or higher than in the traditional material [20,28], with results relying less on the quality or origin (laboratory-scale crushing of management plant products or on-site demolition of concrete structures) of the recycled fines.

Even less research has been conducted on MRA fines (RFA<sub>M</sub>). Ahmed [29] found that 28 d compressive strength was not significantly affected by replacement of up to 50%, exhibiting a rise of ~7%. Bravo [30], in contrast, observed a ~7% loss in 28 d performance with 10% replacement and ~45% for 100% replacement. The latter authors also reported that the declines steepened with replacement ratio and were more sensitive to the nature and composition of the waste at ratios of 50% or higher. Similarly, Kirthika et al. [31], like other authors, concluded that the optimal ratio for RFA<sub>R</sub> is 30% and observed maximum declines in strength of ~17% at 50% to 100% replacement.

Very few studies on the effect of simultaneously including concrete coarse aggregate and RFA<sub>R</sub> have been published and none whatsoever for RFA<sub>M</sub>. Sim and Park [32] assessed the behaviour of recycled concrete with 100% concrete coarse aggregate and 30% to 100% fines, obtaining concretes with a compressive strength of over 40 MPa (maximum loss of 14% relative to traditional concrete) when < 60% of the fines were replaced. Wang et al. [20], simultaneously using 50% and 100% coarse and 50% to 100% fine concrete aggregate, observed a maximum drop in compressive strength of ~10% in the mix containing a 100% recycled granular skeleton. Along those same lines, Zhang et al. [25] analysed the behaviour of mixes bearing 35% or 70% RFA<sub>R</sub> and 35% to 70% coarse



**Table 1**  
Legislation on the use of recycled aggregate in concretes [18,19].

Country	Aggregate type	Composition	Fraction	Max. replacement (%)	Concrete type	Strength class
AustraliaAS 1141.62 / HB 155:2002	RCA (Class 1A)	–	Coarse	30	Structural	C40/50
	MRA (Class 1B)	Rb < 30%		100	Structural	C25/30
ChinaGB/T-25177	RCA - Type I	–	Coarse	100	Structural	No limit
	RCA - Type II	–		30	Structural	C40/50
	RCA - Type III	–		30	Structural	C25/30
	RCA - Type I	–	Fine	100	Structural	C40/50
	RCA - Type II	–		30	Structural	C25/30
	RCA - Type III	–		30	Non structural	–
KoreaKS-F-2573	RCA	–	Coarse	30	Structural	27 MPa
		–	Coarse + Fine	30	Non structural	21 MPa
Hong KongCS-3:2013/ HKBD 2009/ WBTC-No. 12	RCA	–	Coarse	20	Structural	C25/30 – C35/45
		–		100	Non structural	–
JapanJIS-5021/ JIS-5022/ JIS-5023	RCA -HQ	–	Coarse	100	Structural	C45/55
	–	–	Fine	100		
	RCA - MQ	–	Coarse	100	Structural	C35/45
	–	–	Fine	100		
BelgiumPTV 406–2003/ NBN B 15–001	RCA - Type A	Rc + Ru > 95, Ra < 1	Coarse	50, 30, 20*	Structural	C30/37
	MRA - Type B	Rc + Ru > 70, Rb < 30, Ra < 5	Coarse	20	Non structural	C20/25
	–	–	Fine			
GermanyDIN 4226–101, DAfStb	RCA - Type A	Rc + Ru > 90, Rb < 10, Ra < 1	Coarse	45, 35, 25*	Structural	C30/37
	MRA - Type B	Rc + Ru > 70, Rb < 30, Ra < 1	Coarse	35, 25*	Structural	C30/37
ItalyNTC-2008	RCA 1	Rc + Ru > 95	Coarse	30	Structural	C30/37
	–	–		60		C25/30
	RCA 2	–		15		C45/55
DenmarkDS 2426/ DCA No. 34	MRA	–	Coarse	100	Non structural	10 MPa
	RCA 1	Rc + Ru > 95	Coarse	100	Structural	C40/50
	RCA 2	–	Coarse and fine	100		
NetherlandsNEN-5905	MRA	Rc + Ru < 95	Coarse	100	Non structural	C20/25
	–	–	Fine	20		
	RCA	Rc + Ru > 90	Coarse	20	Structural	C55/67
PortugalLNEC - E471	RCA 1	Rc + Ru > 90, Rb < 10, Ra < 5	Coarse	25	Structural	C40/50
	MRA	Rc + Ru > 70, Rb < 30, Ra < 5	Coarse	20		C35/45
SwitzerlandMB – 2030	RCA 1	Rc < 25, Ru > 75, Rb < 5, Ra < 1	Coarse	100	Structural	No limit
	RCA 2	Rc > 25, Ru < 75, Rb < 5, Ra < 1		100		
	MRA	Rc + Ru < 95, Rb > 5, Ra < 1		100		
United KingdomBS 8500–2	RCA	Rb < 5%, Ra < 5	Coarse / Fine	20	Structural	C40/50
	RCA 1	Rc + Ru > 95, Rb < 10, Ra < 1	Coarse	60, 30, 20	Structural	No limit
	RCA 2	Rc + Ru > 90, Rb < 10, Ra < 10		40, 15		
FranceNF P 15–545	MRA	Rc + Ru > 70, Rb < 30, Ra < 10		30, 5		
	RCA	Rb < 5, Ra < 1	Coarse	20	Structural	C40/50
	RCA	Rc + Ru > 95, Rb < 5, Ra < 1	Coarse	50, 30	Structural	No limit
SpainEHE-08 EN 206	MRA	Rc + Ru > 70, Rb < 30, Ra < 5		50, 20		C30/37
	RCA	Rc < 100	Coarse	100	Structural	C50/60
RILEM BrazilNBR 15,116	RCA	Rc + Ru > 90	Coarse / Fine	100	Non structural	–
	MRA	Rc + Ru < 90			structural	–

**Notes.** – **RCA:** recycled concrete aggregate; **MRA:** mixed recycled aggregate; **HQ:** high quality; **MQ:** medium quality; **LQ:** low quality; **Rc:** concrete and bound mortar; **Ru:** unbound aggregate; **Rb:** masonry material; **Ra:** asphalt; and **\*Replacement ratio by exposure class.** the higher the exposure class, the lower the replacement ratio.

RCA, reporting the optimal replacement ratio for  $RFA_R$  to be 70% and for the coarse material 35%, at which combination the rise in compressive strength was ~ 26%. Berredjem et al. [33] replaced 100% of both fractions of the natural aggregate, recording 28 d compressive strength of over 25 MPa, albeit with a decline of ~ 11% relative to the non-recycled concrete. Velay-Lizancos et al. [34] used 8% to 31% of 0/12 mm recycled concrete aggregate, finding a 28 d loss in performance of ~ 30% relative to the material with 100% natural aggregate. Lotfy and Al-Fayez [35], analysing the effect of 0/20 mm recycled concrete aggregate at 10% or 20% replacement, found the new concretes to exhibit strength of over

35 MPa and their 28 d compressive strength to be < 3% lower than in the reference. Guo et al. [26] replaced 75% and 100% of the coarse fraction simultaneously with 30%, 60% or 100% of the fines, observing a decline in compressive strength of 27% to 42%.

The environmental benefits of using recycled aggregate to manufacture concrete have been explored by some researchers, even though the impact of cement, which accounts for around 85% of the total greenhouse gases associated with such manufacture [36], is much more significant. Hossain et al. [37] estimated that whereas 23 kg of  $CO_{2eq}$  are emitted for every tonne of natural aggregate processed from river sand and 33 kg per tonne processed

from crushed stone, just 12 kg of CO<sub>2eq</sub> per tonne are generated in recycled fine and 11 kg per tonne in recycled coarse aggregate production. Visintin [17] reported that the lower emissions attendant upon the replacement of natural aggregate with recycled aggregate in mixes with  $f_{ck} \leq 45$  MPa were unrelated to any significant decline in mechanical strength or durability. Similarly, Jiménez [16], Alnahhal [12] and Kurda [38] observed that using recycled aggregate lowered the overall emissions (in kgCO<sub>2eq</sub>/m<sup>3</sup>) resulting from concrete manufacture by 5.84% to 14.3%. Coelho and de Brito [39] confirmed that replacing natural with recycled aggregate in the construction industry lowers CO<sub>2eq</sub> emissions by up to 10-fold and primary energy consumption by eight-fold. Other, more indirect environmental benefits can also be attributed to the use of recycled aggregate, such as the minimisation of the visual impact of stockpiled C&DW, the emissions generated by its transport to landfills and the consumption of natural aggregate, which accounts for approximately 65 vol% of concrete.

Against that backdrop, the present study aimed to fill the gap in the scientific and technical understanding of the behaviour of concretes bearing recycled coarse and fine aggregates both, with a first-time assessment of the effect of combining coarse recycled concrete aggregate and mixed recycled sand in the same granular skeleton. Another original contribution stemming from this research initiative lies in its verification of the mathematical expressions that correlate the mechanical properties of recycled and conventional concretes and the correction factors proposed for new concretes bearing both fine and coarse recycled materials. It also constitutes a step forward in the identification of the variables that affect such new concretes most intensely.

In pursuit of those aims, the present study explored the effect of replacing 25%, 50%, 75% or 100% of coarse natural with recycled aggregate and simultaneously substituting 50% recycled concrete or mixed sand for natural fines in structural concretes with characteristic strength of 30 MPa (C30/37). The fresh state properties studied included consistency, density and entrained air content and the hardened properties compressive, tensile and flexural strength. The environmental benefits of these new recycled concretes were assessed by quantifying the natural resources consumed and CO<sub>2</sub> emitted. The strength findings were tested statistically with analysis of variance (ANOVA) to determine the possible significance of the relative effects of and interference between variables. The mathematical expressions developed for the indirect calculation of tensile and flexural strength values based on experimentally measured compressive strength were compared to those reported in the literature and in place in structural codes.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials

The natural aggregate used was crushed graywacke with an irregular morphology and sharp edges (Fig. 1), characterised by

three particle size fractions: 0/6 mm (finely crushed stone, CS-F), 6/12 mm (medially crushed stone, CS-M) and 12/20 mm (coarsely crushed stone, CS-C). Although primarily a siliceous material with around 60% SiO<sub>2</sub>, this aggregate also contained Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO and Na<sub>2</sub>O. Its mineralogy included quartz, feldspars and chlorite and mica group phyllosilicates.

The recycled coarse and fine aggregates (Fig. 2) were supplied by ARAPLASA, a CDW management plant located at Plasencia in the Spanish province of Cáceres. The coarse fractions, i.e. recycled crushed concrete (RCC, 12/22 mm) and recycled concrete gravel (RCG, 6/12 mm) consisted in crushed concrete only, whereas the fines (RF) were sourced from two origins: i) fines generated during concrete crushing operations (recycled concrete sand - RCF) to produce the coarse fractions used in this study; and ii) fines from mixed CDW (recycled mixed sand - RMF), bearing ~ 85% concrete, bound mortar and loose aggregate; and ~ 15% masonry materials. Its morphology was irregular, with some rounded and other needle-shaped or flaky particles. The reddish colour in RMF was associated with the presence of masonry particles.

The European standard EN 197-1-compliant [40] CEM I 42.5 R portland cement used was supplied by a Lafarge Holcim group plant at Villaluengo de la Sagra in the Spanish province of Toledo.

FUCHS Lubricantes S.A.U. supplied FUCHS BRYTEN NF, the brownish, chloride-free, water-based modified polycarboxylate water-reducing admixture used, with solids content = 20%, density = 1.1 g/cm<sup>3</sup> and pH = 8.0.

### 2.2. Aggregate characterisation

The recycled coarse aggregate used in this study was a type A recycled concrete aggregate as defined in European standard EN 206 [41]: i.e., it contained over 95% concrete + unbound aggregate (Rc + Ru) (Table 2). The compositional requirements laid down in Spain's existing structural concrete code for recycled concrete aggregate are also given in Table 2. The table also establishes the presence of minority components ( $\leq 1\%$ ), such as masonry waste, floating particles and others.

The physical, chemical and mechanical properties of the aggregates used are compared in Table 3 to European standard EN 12,620 requirements.

The oven-dried recycled aggregate particles exhibited a density greater than the 2.1 Mg/m<sup>3</sup> required of type A coarse concrete (EN 206-1 [41]), although the crushed concrete (RCC) was 1.44% and the gravel (RCG) 2.16% less dense than the respective natural materials. The recycled concrete fines (RCF), in turn, were 1.06% and the recycled mixed sand (RMF) 4.26% less dense than the natural sand (CS-F). The decline in density in the recycled concrete materials was attributable primarily to the presence of bound mortar, whereas in the RMF it was due both to that presence (Rc + Ru ~ 85%) and to masonry waste (Rb ~ 15%), which is less dense than natural aggregate. Those values lay within the range reported by Pedro et al. [43] (1.62% to 6.92%) for recycled concrete



Fig. 1. a) Finely crushed stone (CS-F); b) medially crushed stone (CS-M); c) coarsely crushed stone (CS-C).

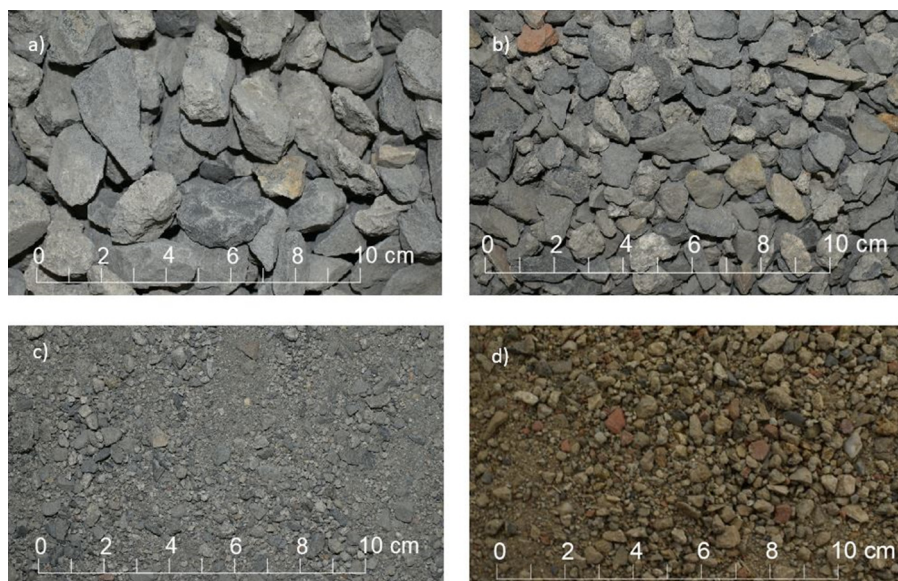


Fig. 2. a) Recycled crushed concrete (RCC); b) recycled concrete gravel (RCG); c) recycled concrete sand (RCF); and d) recycled mixed sand (RMF).

**Table 2**  
Classification of the coarse fraction of recycled aggregates as per EN 933-11 [42].

Type	Code	Amount (wt%)		
		RCG	RCC	EHE-08
Concrete, concrete products, mortar	Rc	39.28	42.58	> 95%
Unbound mortar, natural stone	Ru	59.90	56.37	
Masonry	Rb	0.73	0.66	<5%
Asphalt	Ra	0.00	0.08	≤ 1%
Floating particles	FL	0.03	0.02	≤ 1%
Other (metal, plaster)	X	0.06	0.29	-
Other + glass	X + Rg	0.06	0.29	≤ 1%

**Note.** - RCG: recycled concrete gravel; RCC: recycled crushed concrete.

**Table 3**  
Physical, mechanical and chemical properties of the aggregates studied.

Property [standard]	Aggregate							EN 12,620
	CS-F	RCF	RMF	CS-M	CS-C	RCG	RCC	
Density (Mg/m <sup>3</sup> ) [50]	2.82	2.79	2.70	2.78	2.77	2.72	2.73	-
Sorptivity (wt%) [50]	1.18	4.42	5.39	0.88	0.78	5.40	3.63	<5
Fines equivalent (wt%) [51]	73	61	66	-	-	-	-	>70
Los Angeles coefficient (wt%) [52]	-	-	-	16	18	27	27	<40
Flakiness index (wt%) [53]	-	-	-	20.36	24.79	16.08	20.85	<35
Water-soluble chlorides (wt%) [54]	<0.01	-	-	-	-	-	-	<0.05
Acid-soluble sulfates (wt%) [54]	<0.002	-	-	-	-	-	-	<0.80
Total sulfates (wt%) [54]	<0.001	-	-	-	-	-	-	<1

**Note.** - CS-F: finely crushed stone; RCF: recycled concrete sand; RMF: recycled mixed sand; CS-M: medially crushed stone; CS-C: coarsely crushed stone; RCG: recycled concrete gravel; RCC: recycled crushed concrete.

aggregate and similar to the Zhao et al. [44] (4.51%) findings for mixed sand.

Water absorption, another physical property, was 3.4-fold higher in RCF and 4.6 times greater in RMF than in CS-F. The values found were consistent with the data recorded by Wagih [45] for recycled concrete coarse aggregate (3.9% to 7.15%) and with those published by Kenai [46] (3.5% for coarse and 5.0% for fine aggregates). The value recorded for RMF was lower than the 7.4% to 15% observed in earlier studies [30,47]. Such wide variability was closely related to the compositional differences in the mixed recycled sand studied. Although the RCG and RMF contents were slightly over the 5% ceiling stipulated in Spanish code EHE-08

and European standard EN 12620, the granular skeleton in all the mixes prepared was smaller than the established limit.

The quality of the RCF and RMF sand equivalent was lower than the minimum provided in EHE-08, with the concrete aggregate exhibiting lower quality than the mixed material.

RCG had a lower flakiness index than CS-M and RCC than CS-C because the recycled aggregates had smoother, more rounded edges owing to the bound mortar. As the new aggregates also exhibited lower abrasion resistance (Los Angeles coefficients) likewise due to the bound mortar, they were more friable than the natural materials. The coefficient was nonetheless lower than the 40 wt% upper limit specified by EHE-08 and 50 wt% by EN 206-1



for recycled coarse aggregates. The values cited were also in line with [48,49] or higher than [46] other authors' findings.

All the aggregates were EHE-08-compliant in terms of their chloride and total and acid-soluble sulfate contents and none contained organic matter.

Fig. 3 plots the particle size curves for the aggregates used, along with the upper and lower limits recommended in EHE-08 Section 28.4.1 for fine aggregates used in structural concretes and the ceiling content for fines measuring 0.063 mm or under. Given that the coarse fraction ( $d > 4$  mm) curves for the natural and recycled materials were practically identical, the particle size distribution of these aggregates could not have affected recycled concrete workability. Irrespective of the nature of the fines studied, all lay within the range of allowed particle sizes. Given the similar distribution exhibited, they could not have affected concrete workability either.

The CS-F content was slightly higher than the 10% limit set out in EHE-08 for concretes with non-limestone aggregates and unspecified or general exposure classes I (XO) or II (XC).

Recycled (crushed concrete and RMF) aggregate alkali-silica reactivity found with the accelerated method applied to mortar specimens as per Spanish standard UNE 146,508 [55] is graphed in Fig. 4. Expansion in the 14 d mortars bearing the aggregates studied here was lower than the 0.10% ceiling stipulated to qualify as a non-reactive material. The greater expansion in the crushed concrete aggregate than in the mixed fines may be attributable to the capacity of the concrete + bound mortar fraction (Rc), which is present in a higher proportion in the former, to release alkalis retained in the pore solution [56].

### 2.3. Mix design

The 15 mixes studied were batched as summarised in Table 4. The reference contained 100% natural aggregate (HP); and of the experimental mixes, four were prepared with recycled coarse aggregate at replacements of 25% (HR-25), 50% (HR-50), 75% (HR-75) and 100% (HR-100); one had natural coarse aggregate and 50% recycled concrete sand (HR-0 + 50); four 50% recycled concrete sand and recycled coarse aggregate at 25% (HR-25 + 50), 50% (HR-50 + 50), 75% (HR-75 + 50) or 100% (HR-100 + 50); one natural coarse aggregate and 50% recycled mixed sand (HR-0 + 50 M); and four 50% recycled concrete sand and 25% (HR-25 + 50 M), 50% (50 + 50 M), 75% (HR-75 + 50 M) or 100% (HR-100 + 50 M) recycled coarse aggregate.

The mixes were prepared as described in [57] for a characteristic design strength ( $f_{ck}$ ) of 30 MPa (C30/37), a maximum aggregate particle size of 20 mm and a constant effective water/cement ratio

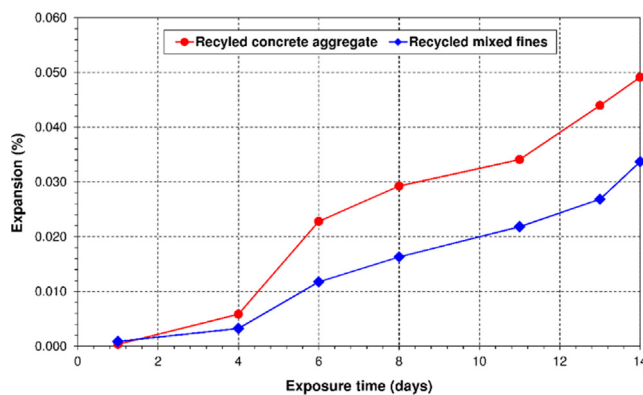


Fig. 4. Alkali-silica reaction in recycled aggregates.

of 0.45. They were batched assuming the aggregate to be dry and correcting for 70% water absorption in the recycled and natural aggregates to ensure that all the mixes, irrespective of their granular skeleton, had the same amount of water available (180 L water/ m<sup>3</sup> concrete) to hydrate the cement. As a result, the mixes had different total water contents depending on the replacement ratio for the recycled aggregate. Suitable workability was obtained with 6.20 kg/m<sup>3</sup> of admixture.

All the mixes were compliant with the 300 kg/m<sup>3</sup> minimum cement and 0.55 maximum w/c ratio laid down in Section 37.3.1 of Spain's structural concrete code EHE-08 [58] for reinforced concrete exposed to carbonation-mediated corrosion (exposure class II or XC).

The flow chart in Fig. 5 illustrates the procedure for preparing the mixes studied. The first step consisted in blending the natural and recycled aggregates in the mixer for 30 s. The cement was then added and blended with the aggregates for a further 60 s, after which the admixture was diluted in 10% of the mixing water and mixed with the dry materials for 45 s. That was immediately followed by mixing 70% of the water with the other components until uniformly blended. The remaining 20% of the water was then added and the full load mixed for 240 s.

### 2.4. Experimental

Prior to mixing, the aggregates were characterised for their physical, chemical and mechanical properties as set out in European standard EN 12,620 [59] on concrete aggregates to calculate the parameter values for mix design.

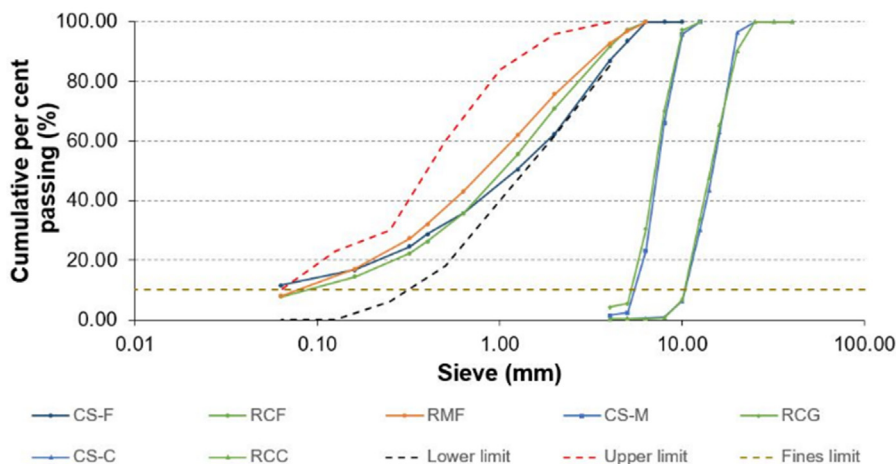


Fig. 3. Aggregate particle size distribution.

**Table 4**  
Mix batching.

Mix	Component (kg/m <sup>3</sup> )							
	CS-F	RCF/RMF	CS-M	CS-C	RCG	RCC	Cement	Water
HP	732.36	0.00	382.96	766.69	0.00	0.00	400.00	193.03
HR-25	724.65	0.00	284.20	568.96	92.01	186.72	400.00	197.37
HR-50	716.94	0.00	187.45	375.27	182.06	369.46	400.00	203.86
HR-75	711.16	0.00	92.97	186.12	270.88	549.72	400.00	209.18
HR-100	701.52	0.00	0.00	0.00	356.29	723.03	400.00	214.20
HR-0 + 50	360.4	349.21	376.92	754.58	0.00	0.00	400.00	203.93
HR-25 + 50	358.47	347.35	281.18	562.91	184.73	281.18	400.00	209.38
HR-50 + 50	354.62	343.61	185.43	371.24	180.10	365.49	400.00	214.55
HR-75 + 50	349.80	338.94	91.46	183.10	266.48	540.79	400.00	219.48
HR-100 + 50	345.94	335.21	0.00	0.00	351.39	713.10	400.00	224.40
HR-0 + 50 M	358.47	344.15	374.9	750.55	0.00	0.00	400.00	206.97
HR-25 + 50 M	355.58	341.37	278.91	558.37	90.29	183.24	400.00	212.27
HR-50 + 50 M	353.65	339.52	184.93	370.23	179.61	364.50	400.00	217.60
HR-75 + 50 M	346.91	333.05	90.70	181.58	264.28	536.32	400.00	222.21
HR-100 + 50 M	344.02	330.27	0.00	0.00	349.43	709.13	400.00	227.19

**Note.** –**HR-X**: concretes bearing finely crushed stone and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50**: concretes with 50% recycled concrete sand (RCF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50 M**: concretes with 50% recycled mixed sand (RMF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **CS-F**: finely crushed stone; **RCF**: recycled concrete fines; **RMF**: recycled mixed fines; **CS-M**: medially crushed stone; **RCG**: recycled concrete gravel; **RCC**: recycled crushed concrete.

The concretes, in turn, were studied in the fresh and hardened state to determine the properties listed in Table 5 on a total of 30 specimens per mix, demoulded after 24 h and cured in water until the test age.

In addition, analyses were conducted as recommended in ASTM D4404 [67] to establish the effect of recycled concrete coarse aggregate, separately or together with recycled concrete or recycled mixed sand, on new concrete total porosity and particle size distribution. The Micromeritics Autopore IV 9500 mercury porosimeter used for the analyses features operating pressures of up to 33 000 psi (227.5 MPa) and a measuring range of 0.006 μm to 175 μm. Pore system characteristics were assessed in a selection of the mixes: HP and the concretes with the lowest (HR-25, HR-25 + 50 and HR-25 + 50 M) and intermediate (HR-75, HR-75 + 50 and HR-75 + 50 M) percentages of coarse concrete aggregate and/or recycled sand.

2.5. Statistical analysis

The possible direct effect of the substitution of recycled for natural aggregate on the mechanical properties of the concretes was

determined with analysis of variance (ANOVA) conducted on each fines type, age and property, for a total of 10 analyses in a statistical and graphics environment generated with (v. 3.6.1) R software.

The model tested with two-way ANOVA (factors: % recycled coarse aggregate and % of recycled fines with interaction) is set out in Equation (1):

$$Y_{ijk} = \mu_{11} + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad i = 1, \dots, 4; \quad j = 2; \quad k = 1, \dots, 3 \tag{1}$$

The model found the response variable ( $Y_{ijk}$ ), i.e., the strength found for each combination, by summing a series of factors:  $\mu_{11}$ , the mean strength for the reference concrete (HP);  $\alpha_i$ , the mean relative effect of using recycled coarse aggregate at the respective ratio (25%, 50%, 75% or 100%);  $\beta_j$ , the mean relative effect of using recycled fines;  $\alpha\beta_{ij}$ , the mean relative effect of the interaction between coarse and fine aggregates; and  $\varepsilon_{ijk}$ , model disturbance.

The ANOVA, in turn, yielded the value of the model coefficients and determined which were statistically significant, expressed as the replacement ratios at which the rise or decline in strength

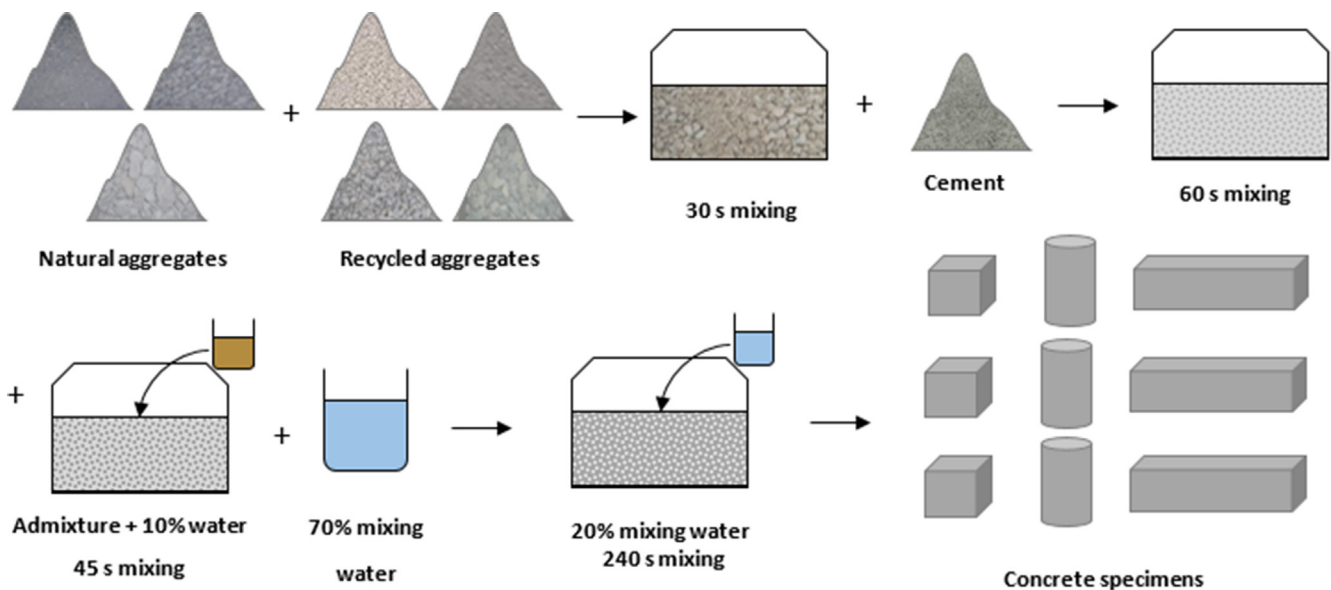


Fig. 5. Concrete preparation.

**Table 5**  
Concrete properties studied.

Property	Standard	Specimen size (cm)	NS/S	Test age (days)
<b>Fresh state</b>				
Bulk density	EN 12350-6[60]			*
Entrained air	EN 12350-7[61]			*
Consistency	EN 12350-2[62]			*
<b>Hardened state</b>				
Bulk density	EN 12390-7[63]	15x15x15	18	28
Compressive strength	EN 12390-3[64]	15x15x15	18	7, 28 and 90
Splitting tensile strength	EN 12390-6[65]	∅10x20	6	28
Flexural strength	EN 12390-5[66]	10x10x40	6	28

Notes. - NS/S: Number of specimens per sample; \* Property assessed when manufactured.

would ( $p$ -value < 0.05) need to be taken into consideration in the calculations.

Calculation of the coefficients comprising the analyses was preceded by verification of the assumptions of model homoscedacity (Bartlett's test) and normality (Shapiro-Wilk method). The values found for the analyses given in Table 6 were all above 0.05, an indication that all the datasets had similar variances (homoscedacity) and were normally distributed (normality).

Further to the aforementioned verification of the initial assumptions, the model results were accepted as valid. The values for model coefficients, where found to be significant, are listed in Table 7.

As the data in Table 7 show, compressive strength tended clearly downward with the inclusion of (coarse or fine) recycled aggregate. In contrast, no statistical evidence (presence of significant factors) was found that the use of recycled aggregate had any significant effect on either splitting tensile or flexural strength.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Fresh concrete properties

Further to the data on fresh concrete properties listed in Table 8, all the mixes were soft (6 cm to 9 cm) as defined in EHE-08 Section 31.5, which is equivalent to consistency S2 in European standard EN 206 [41]. Those findings, which confirmed that the use of recycled aggregate had no effect on concrete workability irrespective of fraction, replacement ratio or nature, were consistent with the data reported by other authors replacing up to 100% of the coarse and fine fractions with recycled concrete [68], mixed [30,69] or masonry [70] aggregate.

The use of recycled aggregate induced declines in concrete fresh state density (Table 8), which steepened with rising replacement ratio due to the lower density of the new aggregates. The concretes with 50% RMF (HR-X + 50 M) were less dense than those bearing 50% RCF (HR-X + 50), which were in turn less dense than the HR-X concretes with finely crushed stone. The loss recorded here was consistent with the 2.4% to 5% observed by Xiao et al. [68].

**Table 6**  
Tests for homoscedacity and normality.

Test	Mechanical property									
	Compressive strength					Tensile strength		Flexural strength		
	CS-F-RCF 7d	CS-F-RMF 7d	CS-F-RCF 28d	CS-F-RMF 28d	CS-F-RCF 90d	CS-F-RMF 90d	CS-F-RCF 28d	CS-F-RMF 28d	CS-F-RCF 28d	CS-F-RMF 28d
Bartlett	0.639	0.329	0.485	0.256	0.673	0.553	0.749	0.420	0.932	0.434
Shapiro-Wilk	0.448	0.811	0.187	0.082	0.603	0.437	0.467	0.149	0.968	0.654

Notes. - CS-F-RCF: natural aggregate mix – recycled concrete sand mix; and CS-F-RMF: natural aggregate mix – recycled mixed sand mix.

Fig. 6 illustrates the linear relationship ( $R^2 > 0.8$ ) between coarse aggregate replacement ratio and fresh state density for the various concrete families as defined by sand type. The respective equations can be used to calculate density in terms of coarse aggregate replacement ratio (Fig. 5) when the proportion between natural and recycled sand is constant. Fresh state density was observed to decline more sharply in concretes with mixed than in those with concrete aggregate as a result of the wider difference in density between the former and natural aggregate.

The entrained air content for mixes with natural and recycled concrete sand ranged from 1.6% to 1.85% and to slightly more in the HR-X + 50 M concretes due to the lower density and hence greater porosity in these materials. Those findings were consistent with the results reported by Cantero et al. [71] for concretes bearing recycled mixed coarse aggregate (6/12 mm to 12/22 mm) and Yaprak [72] for recycled mixed fines.

#### 3.2. Hardened state properties

##### 3.2.1. Bulk density

Fig. 7 plots the variation in concrete bulk density with coarse aggregate replacement ratio in concrete families bearing HR-X, HR-X + 50 and HR-X + 50 M relative to the reference (HP). Whilst the use of recycled aggregate was observed to prompt a decline in this property in all the materials, the effect was particularly acute in the concretes containing HR-X + 50 M and closely related to the intrinsic properties of the new aggregates (RCC, RCG, RCF and RMF).

Irrespective of the type of fines used, density loss was < 3% for coarse aggregate replacement ratios of 75% or under and ranged from 4.2% in RCF to 5.6% in RMF at 100% replacement. Those values are lower than observed by Dimitriou [73], who reported loss of 6% to 7% for total replacement of the coarse fraction with concrete aggregate.

##### 3.2.2. Porosity

The data in Table 8 for total porosity (Pt) and macropore (MP) volume and in the table and Fig. 8 for mean pore size (MPD) in some of the concretes studied show that Pt, MP and MPD were

**Table 7**  
Estimated values for model parameters.

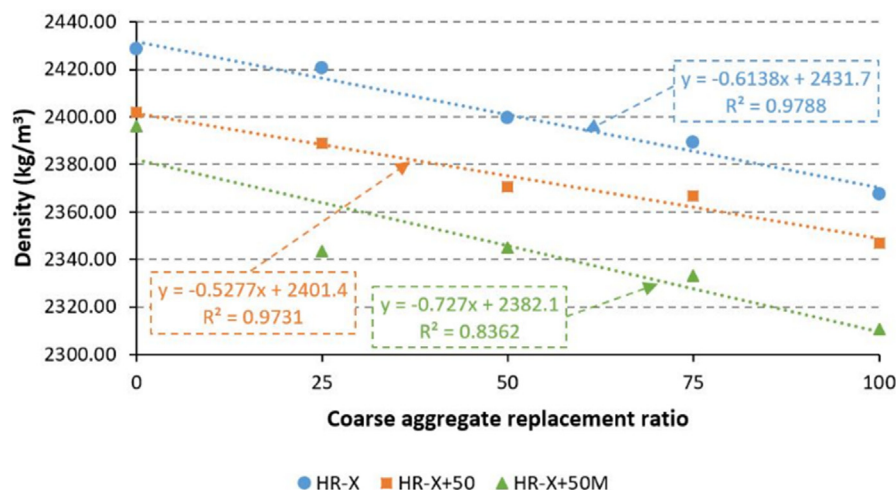
Property/ analysis		Statistical model parameter									
		$\mu_{11}$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\beta_2$	$\alpha\beta_{22}$	$\alpha\beta_{32}$	$\alpha\beta_{42}$	$\alpha\beta_{52}$
Compressive strength	CS-F-RCF 7d	45.27	1.00	NS	-1.13	NS	-2.64	-2.80	5.34	NS	NS
	CS-F-RMF 7d	45.27	NS	NS	-1.13	NS	-1.51	1.96	NS	NS	-1.91
	CS-F-RCF 28d	55.20	-2.87	-3.84	-3.89	-3.49	-6.33	6.81	6.30	5.64	2.79
	CS-F-RMF 28d	55.20	-2.87	-3.84	-3.89	-3.49	-5.43	2.10	2.25	NS	NS
	CS-F-RCF 90d	60.53	NS	-5.12	-1.97	-3.28	-5.39	NS	7.55	NS	2.72
Tensile strength	CS-F-RMF 90d	60.53	NS	-5.12	-1.97	-3.28	-5.51	NS	4.51	NS	NS
	CS-F-RCF 28d	4.08	NS				NS	NS	NS	NS	-0.73
Flexural strength	CS-F-RMF 28d	4.08	NS				NS	NS	NS	NS	-0.80
	CS-F-RCF 28d	6.81	NS	NS	NS	-0.35	NS	No interaction			
	CS-F-RMF 28d	6.85	NS				NS	NS	NS	-0.68	-0.76

**Note.** - NS: Non-significant; **CS-F-RCF**: natural aggregate mix – recycled concrete mix; **CS-F-RMF**: natural aggregate mix – recycled mixed sand mix.

**Table 8**  
Fresh state properties and pore system characteristics in 28 d concretes.

Mix	Fresh state property			Pore system property		
	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Consistency (cm)	Entrained air (vol.%)	Pt (vol.%)	MP (vol.%)	MPD (µm)
HP	2428.56	7.40	1.83	11.65	6.49	0.0395
HR-25	2420.43	8.50	1.85	11.22	5.79	0.0353
HR-50	2399.42	7.00	1.80	-	-	-
HR-75	2389.34	6.63	1.68	12.37	6.87	0.4540
HR-100	2367.38	7.33	1.77	-	-	-
HR-0 + 50	2401.97	8.00	1.60	-	-	-
HR-25 + 50	2388.81	6.33	1.77	11.15	3.89	0.0330
HR-50 + 50	2370.56	6.00	1.80	-	-	-
HR-75 + 50	2366.81	6.00	1.70	13.08	8.07	0.0479
HR-100 + 50	2347.00	6.00	1.80	-	-	-
HR-0 + 50 M	2396.24	7.00	2.00	-	-	-
HR-25 + 50 M	2343.61	6.75	3.70	13.29	9.16	0.0508
HR-50 + 50 M	2344.99	7.00	3.17	-	-	-
HR-75 + 50 M	2333.32	7.50	3.15	13.82	9.54	0.0541
HR-100 + 50 M	2310.51	7.50	2.70	-	-	-

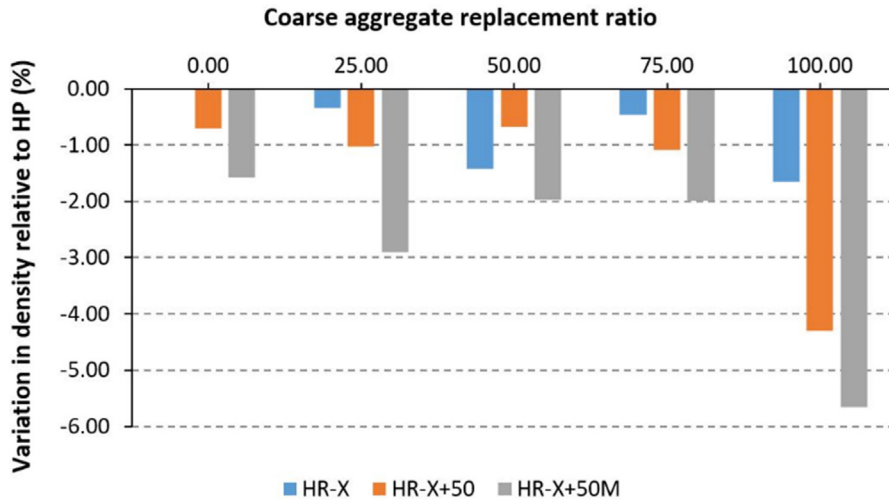
**Notes** –**HR-X**: concretes bearing finely crushed stone and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50**: concretes with 50% recycled concrete sand (RCF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50 M**: concretes with 50% recycled mixed sand (RMF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **Pt**: total porosity; **MP**: macropores; **MPD**: mean pore diameter.



**Fig. 6.** Fresh state density (*Note.* - **HR-X**: concretes bearing finely crushed stone and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50**: concretes with 50% recycled concrete sand (RCF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50 M**: concretes with 50% recycled mixed sand (RMF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X).

lower in concretes HR-25 and HR-25 + 50 than in HP, an indication that use of recycled coarse aggregate alone or together with recycled fines induced a decline in porosity. In new concretes HR-75 and HR-75 + 50, in contrast, the values were higher than in the reference. The latter pattern was observed irrespective of

the coarse fraction replacement ratio when the mixes also bore recycled mixed fines (HR-25 + 50 M and HR-50 + 50 M). Bravo et al. [30] observed the same behaviour and greater macroporosity in concretes bearing recycled fines with a lower percentage of Rc + Ru.



**Fig. 7.** Variation in hardened state bulk density (Note. **HR-X**: concretes bearing finely crushed stone and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50**: concretes with 50% recycled concrete sand (RCF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); **HR-X + 50 M**: concretes with 50% recycled mixed sand (RMF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X).

The behaviour observed would be related to the greater porosity (lower density) in all fractions of the recycled aggregate. That adverse effect would be offset in concretes bearing lower proportions of recycled coarse aggregate by the presence in the bound mortar of anhydrous cement particles that would continue to hydrate, generating a less porous cementitious matrix.

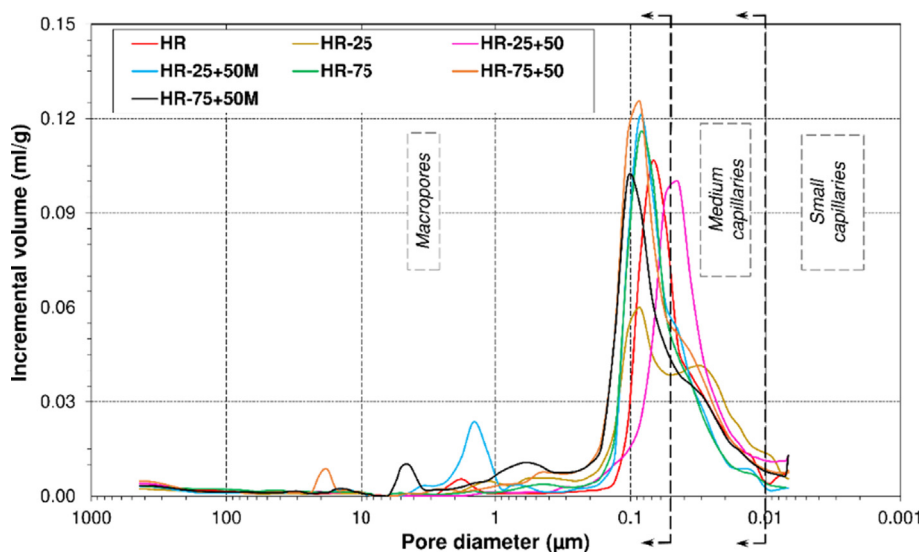
The porosity values found lay within the standard range (10% to 20%) for concretes [74] and were similar to those recorded for other concretes bearing recycled CDW aggregate (10% to 23%) [75–78].

Further to the concrete pore size distribution curves in Fig. 8, mean size was smaller relative to HP in HR-25 and HR-25 + 50 but rose in all the other concretes analysed (see Table 8).

### 3.2.3. Compressive strength

In all the concretes studied, compressive strength at different ages (Fig. 9) was over the 28 d design strength defined, 37 MPa. Fig. 9 shows that depending on the replacement ratio, applica-

tion of these new recycled coarse and fine aggregates induced variations ranging from ~+5% (7 d HR-50 + 50) to ~ -17% (28 d HR-100 + 50 M) relative to HP. Performance declined more steeply in the concretes bearing both recycled sand and recycled coarse aggregate. Strength grew by ~ 3% in 7 d R-25 + 50 M whilst the steepest loss, at 17%, was recorded for 28 d HR-100 + 50 M. That behaviour was related to the lesser uniformity induced by the presence of a larger number of [69] weaker [35] recycled aggregate / paste ITZs, and to the effect of recycled aggregate on pore size distribution. A higher volume of macropores (>0.05 μm) translates into a decline in strength [79] and a loss in load transfer capacity due to the presence of bound mortar in RCA [48]. The steeper decline in RMF than in RCF mixes would be associated with the effect of the former on concrete pore structure, specifically lower density and greater fragility. Both are attributable to the presence of masonry materials, which exhibit greater porosity and lower abrasion resistance than the main components in RCF: unbound aggregate (Ru) and the fraction of concrete with bound mortar (Rc).



**Fig. 8.** Pore size distribution in 28 d concretes.



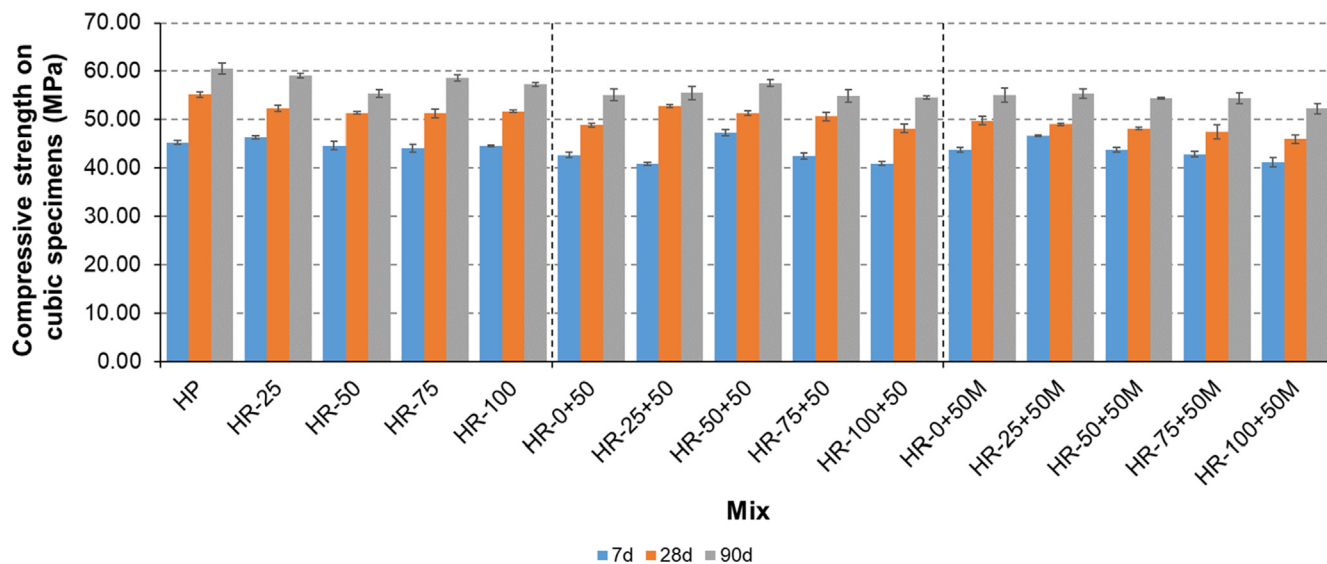


Fig. 9. Compressive strength in 15x15x15 cm³ specimens.

In the mixes HR-X with recycled coarse aggregate only (RCG and RCC), strength ranged from gains of ~2% (7 d HR-25) to losses of ~7% (28 d HR-75). Those findings are similar to the 6% decline reported by authors replacing the entire coarse fraction with concrete aggregate [48,80]. Wang [20] observed moderate declines in strength (8.7% to 14%) when replacing the coarse fraction.

In HR-X + 50 mixes, the simultaneous use of recycled coarse aggregate led to strength loss of under 13%, irrespective of replacement ratio and age. Those values were similar to other authors' results for materials with 50% recycled fines, where losses of 6% were recorded for concretes also bearing 50% and 10% for those with 100% recycled coarse aggregate [81]. Velay [34], in turn, reported losses of 5% to 20% for replacement of up to 30% of both fractions. Some authors, studying mixes with replacement of the fines fraction only, observed strength losses of ~8% at 24% replacement [23] or ~11% for a 50% ratio. Where the entire fines fraction was replaced, the losses were found to be greater, ranging from 20% to 30% [26,82,83].

The 28 d (16.78%) and 90 d (13.60%) losses in mix HR-100 + 50 M were found to be similar. The decline in 7 d strength for the same mix was smaller, at 9.78%, and in line with the 8% observed by Corinaldesi [47] for total replacement of both fractions. In contrast, most of the losses reported in the literature were much steeper than observed here. Bravo [30] obtained 28 d losses of 17% to 30% when replacing 50% of the natural with recycled mixed sand (68%<Ru + Rc < 75% and 11.6%<Rb < 26%) compared to the ~3% decline relative to HP recorded here for HR-0 + 50 M. Khatib and Bravo [30,83] reported losses of up to 20% for a given replacement ratio.

Further to the statistical analysis conducted (Table 7), partial replacement of CS-F with recycled aggregate (RMF/RCF) induced a significant decline in compressive strength irrespective of the nature of the recycled material and age of the concrete. Similarly, the relative effect of replacing the coarse aggregate ( $\alpha_i$ ) was strength loss at all the ages studied. In contrast, the mixes with a replacement ratio of 25% exhibited a slight rise in 7 d strength. The relative effect attributable to fines ( $\beta_j$ ), in turn, consisted in strength loss at all ages in all the mixes studied. The data on interaction between the two aggregates ( $\alpha\beta_{ij}$ ) showed that simultaneous replacement with coarse and fine concrete aggregate had a significantly beneficial impact in all the analyses conducted, miti-

gating the aforementioned relative effects. Performance was highest in the mix with 25% coarse aggregate and RCF, where strength dipped by <5% relative to HP.

The comparison of 7 d and 90 d experimental mix strength to 28 d strength in the reference and the relative strength estimated in Eurocode-2 (EC-2) in Fig. 10 shows that the 7 d values were slightly higher than laid down in the Eurocode for all except mix HR-25 + 50. Initial strength was slightly greater in the mixes with recycled mixed sand than in the reference. In most cases relative 90 d strength was likewise higher than the theoretical value and highest for mixes with no recycled sand. Further to those findings using new recycled aggregates in concrete, irrespective of the fraction involved, had no effect on strength gains over time. Similar observations were recorded by other authors studying the simultaneous replacement of fines and coarse aggregate [48] or coarse aggregate only with CDW materials [71].

Lastly, the failure mechanism was similar in all the mixes at all the ages studied and acceptable as defined in Spanish and European standard UNE-EN 12390-3 (Fig. 11).

### 3.2.4. Splitting tensile strength

The experimental splitting tensile strength values are graphed in Fig. 12, along with the strength estimated ( $f_{ctm}$ ) from the compressive strength found for each mix ( $f_{ck} = f_{cm-8}$ ) further to the equation set out in EHE-08 Section 39.1 ( $f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{2/3}$ ) and the values obtained with the expressions proposed for each case (Equations (2) and (3)).

For the mixes where only the coarse fraction was replaced (RCC and RCG), performance rose with replacement ratio by up to 9.49% at 100% replacement (mix HR-100). In contrast, the simultaneous use of both fractions of recycled concrete aggregate at any replacement ratio yielded lower strength than the reference, with losses of up to 14.13% in mix HR-100 + 50. Slightly higher (+1.74%) strength than in the reference was observed in the concretes bearing mixed fines and no coarse aggregate replacement (mix HR-0 + 50 M). In contrast, strength declined in mixed fine mixes with rising percentages of coarse aggregate replacement, with values of up to 16.77% lower in mix HR-100 + 50 M.

The tensile strength behaviour observed was consistent with the patterns recorded by other authors [84,85] using recycled concrete aggregate, who found strength values up to 18% higher for

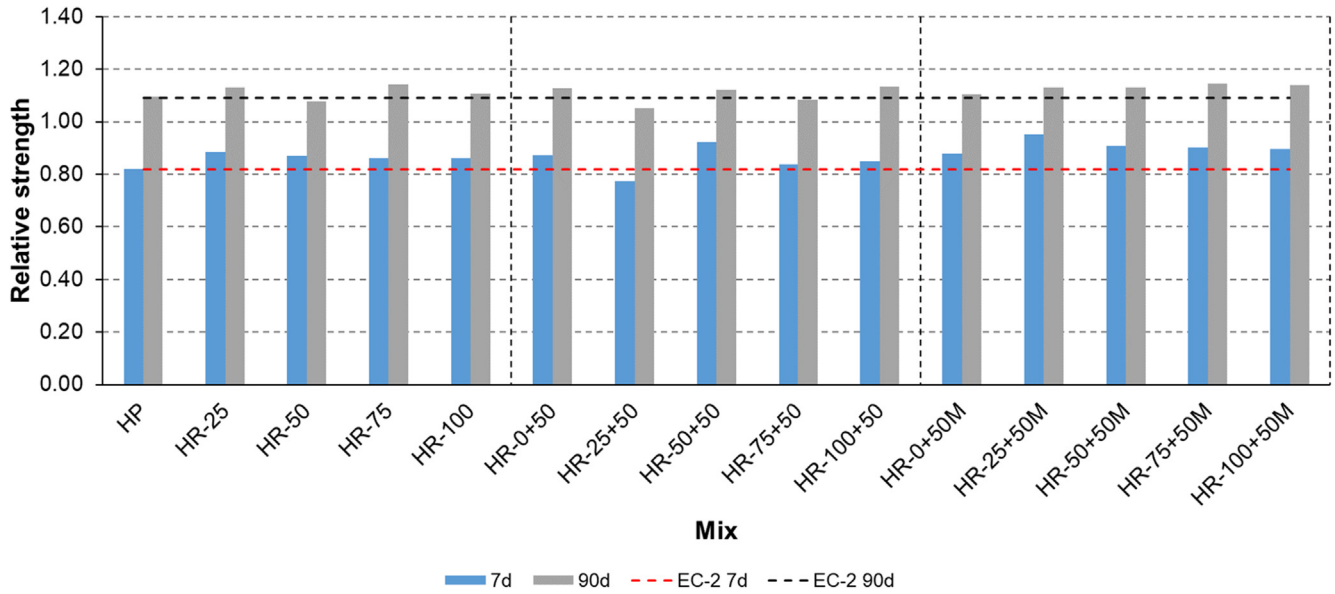


Fig. 10. Compressive strength relative to 28 d strength in HP.



Fig. 11. Failure (left) in HP mixes and (right) in HR-100 + 50 M.

50% replacement. The strength loss with the use of recycled concrete fines (RCF) observed in this study was less steep than reported by other authors. Puente de Andrade [23] observed declines of up to 14% for 24% replacement of the fines fraction with concrete aggregate. Salahuddin [22] recorded losses similar to those

found here, with a 6% dip for 75% fines replacement. Such decreased in strength with rising replacement ratios were attributed to the presence of weaker ITZs resulting from the more porous structure of recycled aggregates [28], the layer of mortar bound to the aggregates and the unbound water in the paste determined by

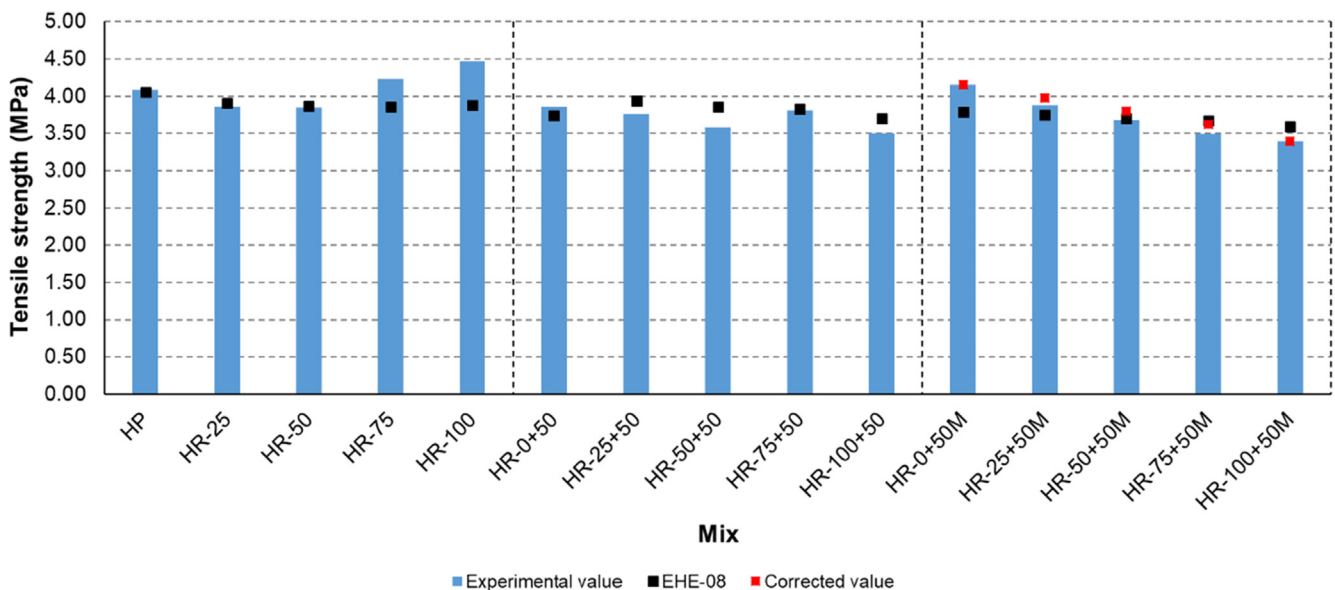


Fig. 12. Splitting tensile strength.

the higher sorptivity in the recycled materials [26]. According to the authors, those factors induced strength loss of up to 30% when the entire fines fraction was replaced with recycled concrete sand (RCF). Evangelista and de Brito [28] nonetheless observed that replacement of up to 30% of that fraction had no significant effect on strength.

The loss reported by other authors replacing both aggregate fractions with concrete aggregate was similar to the values found here. Wang [20] recorded a decline of ~ 13% when replacing 50% of each fraction (mix HR-50 + 50), whilst Ajdukiewicz [86] observed a loss of 0% to 15% when replacing up to 100% of both fractions, depending on the quality of the initial concrete.

Ahmed [29] and Kirthika [31] observed no decline in the tensile strength of new concretes containing recycled mixed sand, although other authors recorded a loss of around 10% when replacing 50% of the fines [30] or 8% when both fractions were fully replaced [47].

Statistically speaking (Table 7), replacing natural with recycled aggregate had no significant effect on tensile strength irrespective of the fraction or nature of the aggregate, although negative interaction ( $\alpha\beta$  values) was observed when all the fractions were replaced with recycled materials.

Two expressions have been proposed to calculate tensile strength indirectly from the compressive strength values (Fig. 9), depending on the replacement ratio and type of recycled sand: one, Equation (2), for mixes with recycled mixed fines (HR-X + 50 M); and the other, Equation (3), for mixes with no recycled sand or 50% recycled concrete fines, also proposed in EHE-08. The difference in the mean empirical value and strength as calculated with these expressions was < 10% in all cases except for HR-100, where the theoretical estimate was 13% lower than the experimental value.

$$f_{ctm} = 0.323 f_{ck}^{2/3} - 0.00539\%_{AG} \quad (2)$$

$$f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{2/3} \quad (3)$$

The mathematical expressions for relating tensile and compressive strength in recycled concretes proposed in earlier studies are listed in Table 9. The expression put forward here for mixed sand (Equation (2)) is similar to the one proposed by Li [87], which includes a factor to correct for the replacement ratio of the recycled aggregate. Equation (3) for natural and concrete sand, in turn, is very similar to the expressions recommended by Xiao et al. [88] and Guo et al. [26] and nearly identical to the EHE-08 equation. Katz [89] proposed a slightly modified version of the expression set out in standard ACI 318 [90]. Silva et al. [91] contended, however, that the equation in the standard need not be modified, beyond including a factor to account for the age of the concrete studied.

**Table 9**  
Expressions proposed by other authors to relate compressive and tensile strength.

Author	Proposal
ACI 318 [90]	$f_{ctm} = 0.5 f_{cm}^{0.5}$
Li [87]	$f_{ctm} = (0.24 - 0.06\%_{AG}) f_{cm}^{2/3}$
Xiao et al. [88]	$f_{ctm} = 0.24 f_{cm}^{0.65}$
Katz [89]	$f_{ctm} = 0.59 f_{cm}^{0.5}$
Silva et al. [91]	$f_{ctm}(t) =  \beta_{cc}(t) ^2 f_{ctm}$
Fonteboa et al. [92]	$f_{ctm} = \frac{1 - 0.086\%_{AG} \cdot \frac{WA}{S}}{1 - 0.605\%_{AG}} \cdot f_{code}^{(1 - 0.465\%_{AG})}$
Guo et al. [26]	$f_{ctm} = 0.29 f_{cu}^{0.66}$

**Note.** -  $f_{ctm}$ : Mean tensile strength;  $f_{cm}$ : mean compressive strength,  $\%_{AG}$ : coarse aggregate replacement ratio;  $WA$ : water sorptivity (%);  $\beta_{cc}(t)$ : time factor;  $f_{code}$ : standard tensile strength.

The expression proposed by Fonteboa et al. [92], likewise based on the standard equation, factors in both the percentage of recycled aggregate and the water absorbed.

All the mixes failed suddenly and explosively, collapsing into pieces, and 50% of the concrete specimens tested exhibited brittle failure. Visible inspection of the fracture surface revealed the uniform distribution of the components in all the concretes, regardless of whether the aggregate was natural or recycled (Fig. 13).

### 3.2.5. Flexural strength

The experimental flexural strength values are graphed in Fig. 14, along with the strength estimated using the equation recommended in EHE-08 ( $f_{ct,m,fl} = 1.6 \cdot h/1000$ ) and Equation (4) proposed here. Strength was observed to decline with rising coarse aggregate replacement ratio, by up to 4.5% in HR-100 (total replacement). Loss in the mixes bearing recycled sand lay within the same range for all the concretes with up to 75% coarse aggregate replacement, but declined at 100% by 9.5% in mixes with 50% RCF (HR-X + 50) and 14.8% for materials with RMF (HR-X + 50 M).

That performance was slightly better than observed by authors using other types of recycled coarse aggregates, such as mixed [71] or masonry [93]. When all the coarse aggregate was replaced (mix HR-100), the strength loss observed here was of the same order of magnitude as reported by Malesev [94] (around 4% for total replacement with concrete aggregate) and lower than found by Topcu and Sengel [95], who observed declines of 7.5% to 9% also when substituting recycled concrete for all the natural aggregate. In this study replacing the fines fraction with recycled concrete (RCF) lay within the 2% to 16% decline recorded by Salahuddin [22] for a ratio of 75%. Lotfy [35] observed slightly lower (<30%) flexural strength relative to the reference with rising recycled aggregate replacement ratio, which the author deemed to be insignificant.

Other authors found flexural strength to rise when recycled mixed sand (RMF) replaced natural fines. Kirthika and Ahmed [29,31] reported rises of 6.7% and 3.2%, respectively, in concretes in which 50% of the fines were replaced.

The same failure mechanism was observed in all the mixes, irrespective of the granular skeleton, namely a large crack beginning in the flexural span and with an orientation normal to the tensile stresses generated due to flexure [24].

The statistical data (Table 7) showed that the adverse effect of replacing the coarse aggregate was significant only for a ratio of 100%. No significant change was observed when the fines were replaced, irrespective of the type of sand involved. When the two types of aggregate were replaced jointly, negative interaction was observed for recycled mixed fines when the coarse aggregate replacement ratio was >75%.

Flexural strength was calculated indirectly with the equation recommended in EHE-08 using the mean compressive strength values shown in Fig. 8. When a correction factor of 1.14 was applied to that expression, as in Equation (4) below, the experimental and calculated values differed within a narrow margin of approximately 7%.

$$f_{ct,m,fl} = (0.547 - 0.342h/1000) f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

## 3.3. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions

### 3.3.1. CO<sub>2</sub> emissions attributable to concrete

The global warming potential (GWP) per cubic metre of the ready-mixed concretes designed and the CO<sub>2</sub> emitted in the manufacture of concrete components given in Table 10 were computed



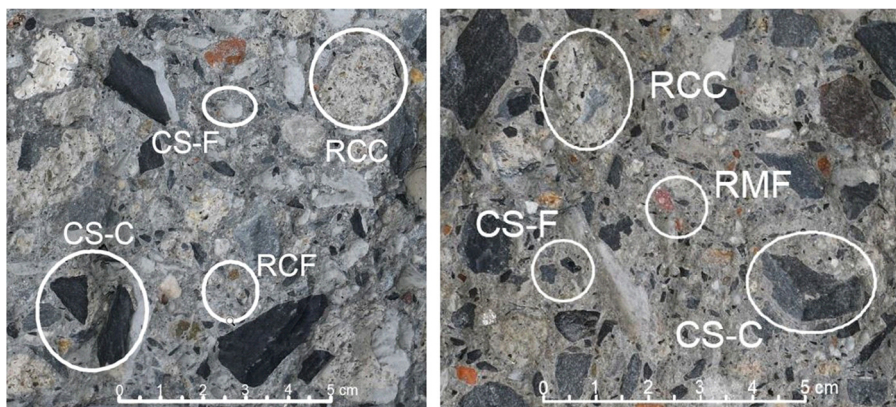


Fig. 13. Distribution of aggregate components in concrete.

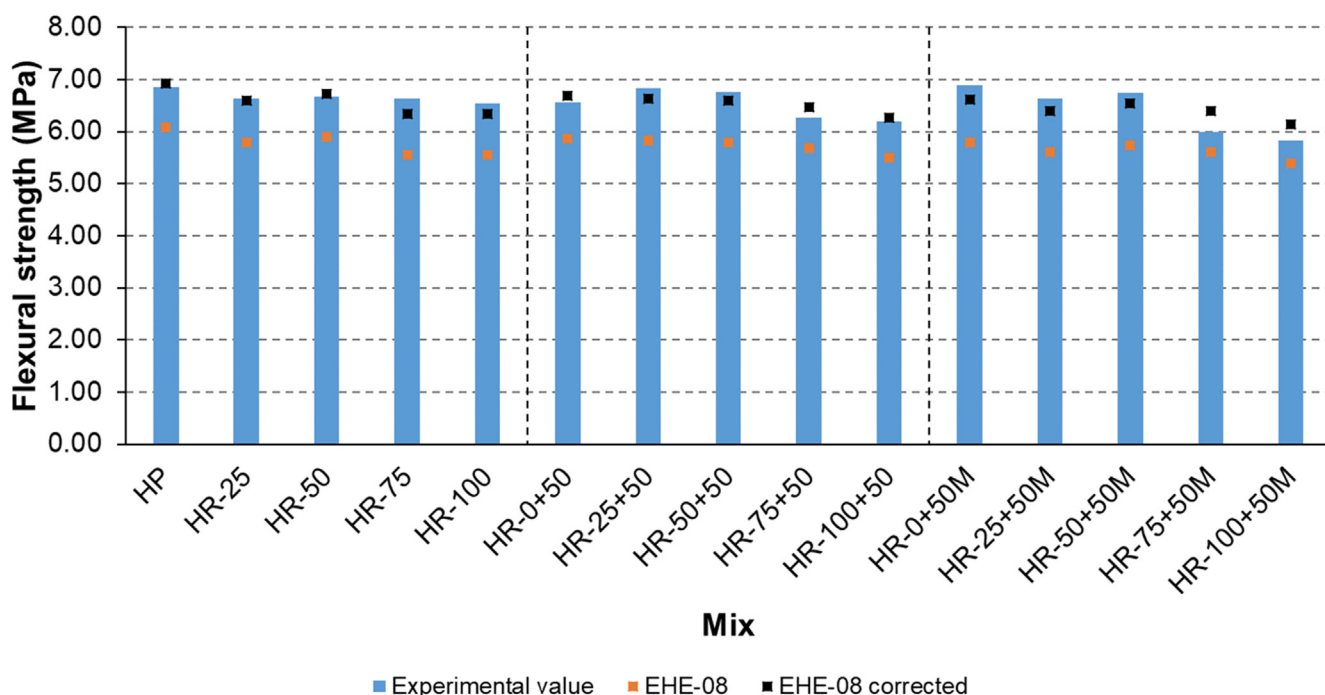


Fig. 14. Flexural strength.

omitting the emissions attributable to transport, which may vary with the distance between the concrete plant and component supplier sites. According to Schneider [96], given that transport-related CO<sub>2-eq</sub>/m<sup>3</sup> for C30/37 concrete with a standard German plant composition amounts to under 2% of total process emissions, it may be deemed negligible, a conclusion drawn earlier by Yang et al. [36]. CO<sub>2</sub> emissions generated in the manufacture of concrete components (natural aggregates, recycled coarse and fine aggregate, cement and water) were calculated averaging the values cited in the literature.

Table 10 shows that cement, the primary source of CO<sub>2</sub> in concrete manufacture, accounts for 85.1% of total emissions in HP and 91.2% in HR-100 + 50 M. Those values are consistent with the data reported by Alnahhal et al. [12], who calculated 84.4% for conventional concrete and 87.1% for concrete bearing 100% recycled concrete coarse aggregate, and by Jiménez et al. [16], who estimated 88.8% for the former and 91.1% for the latter. In other words, both this and other studies [12,16] found cement to carry greater weight in total emissions in recycled than in conventional concretes.

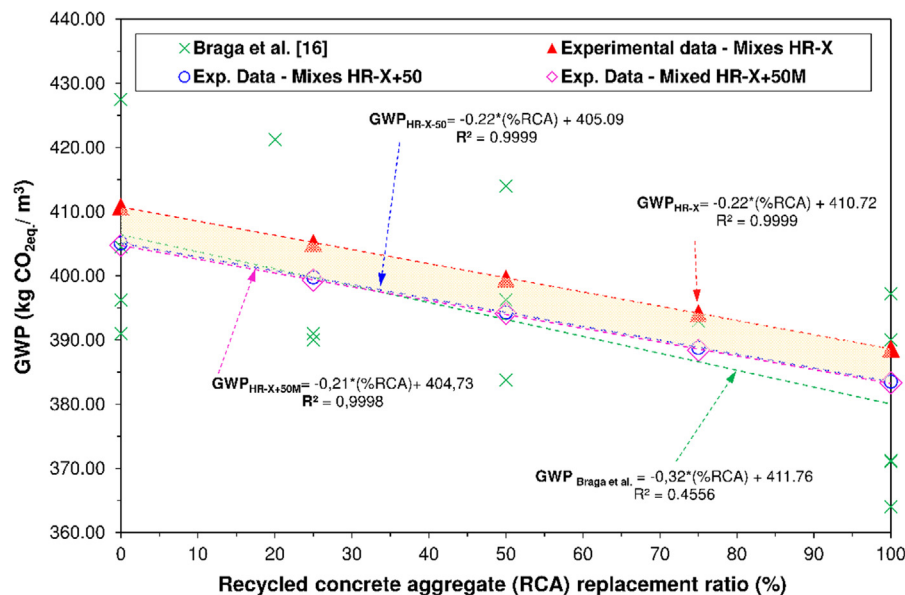
Variations in GWP with recycled concrete aggregate (RCA) content as found here and by Braga et al. [15] for concrete with a class C30/37 cement content greater than or equal to 400 kg/m<sup>3</sup> are plotted in Fig. 15. The graph also shows the pattern of change in GWP in samples bearing 50% RCF (HR-X + 50) or RMF (HR-X + 50 M) and different percentages of RCA. Irrespective of the replacement ratio and fraction of aggregate replaced, GWP was ~ 1.4% to ~ 6.7% lower in all the recycled concretes than in HP, values that are consistent with the data recorded in the literature for similar types of concretes.

With the inclusion of RCA, GWP declined linearly relative to HP with rising replacement ratio, by 1.4% in HR-25 and 5.4% in HR-50. The decline was steeper in concretes bearing recycled materials in both fractions of their granular skeleton, with recycled fines observed to contribute positively to abatement (shaded area in the figure). The data shown for conventional concretes were similar (~7%) to the values reported by Gursel et al. [97] and Alnahhal et al. [12] and ~2% greater than observed by Hanif et al. [98] in concretes containing recycled aggregate. The aforementioned finding was in

**Table 10**  
CO<sub>2</sub> emitted to manufacture concrete components and mixes, per m<sup>3</sup>.

Material/ Reference/ Mix	GWP (kg CO <sub>2eq</sub> / kg)								
	CS-F	RCF/RMF	CS-M	CS-C	RCG	RCC	Cement	Water	
Material	0.025	0.012	0.038		0.020		0.8735	0.000133	
Reference	[12,15,37]	[37]	[12,15,31,37]		[12,15,31,37]		[12,15]	[15]	
Mix	GWP (kg CO <sub>2eq</sub> / m <sup>3</sup> )								
	CS-F	RCF/RMF	CS-M	CS-C	RCG	RCC	Cement	Water	Total
HP	18.26	0.00	43.14	0.00	349.40	0.03	18.26	0.00	410.83
HR-25	18.07	0.00	32.01	5.62	349.40	0.03	18.07	0.00	405.13
HR-50	17.88	0.00	21.12	11.12	349.40	0.03	17.88	0.00	399.54
HR-75	17.73	0.00	10.47	16.54	349.40	0.03	17.73	0.00	394.18
HR-100	17.49	0.00	0.00	21.76	349.40	0.03	17.49	0.00	388.68
HR-0 + 50	8.99	4.19	42.46	0.00	349.40	0.03	8.99	4.19	405.06
HR-25 + 50	8.94	4.17	31.67	5.56	349.40	0.03	8.94	4.17	399.77
HR-50 + 50	8.84	4.12	20.89	11.00	349.40	0.03	8.84	4.12	394.28
HR-75 + 50	8.72	4.07	10.30	16.27	349.40	0.03	8.72	4.07	388.80
HR-100 + 50	8.63	4.02	0.00	21.46	349.40	0.03	8.63	4.02	383.54
HR-0 + 50 M	8.94	4.13	42.23	0.00	349.40	0.03	8.94	4.13	404.73
HR-25 + 50 M	8.87	4.10	31.42	5.51	349.40	0.03	8.87	4.10	399.32
HR-50 + 50 M	8.82	4.07	20.83	10.97	349.40	0.03	8.82	4.07	394.12
HR-75 + 50 M	8.65	4.00	10.22	16.14	349.40	0.03	8.65	4.00	388.43
HR-100 + 50 M	8.58	3.96	0.00	21.34	349.40	0.03	8.58	3.96	383.81

**Note.** -HR-X: concretes bearing finely crushed stone and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); HR-X + 50: concretes with 50% recycled concrete sand (RCF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); HR-X + 50 M: concretes with 50% recycled mixed sand (RMF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); CS-F: finely crushed stone; RCF: recycled concrete fines; RMF: recycled mixed fines; CS-M: medially crushed stone; RCG: recycled concrete gravel; RCC: recycled crushed concrete.



**Fig. 15.** Global warming potential (GWP) per cubic metre of concrete by replacement ratio of recycled concrete coarse aggregate (**Note.** - HR-X: concretes bearing finely crushed stone and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); HR-X + 50: concretes with 50% recycled concrete sand (RCF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X); HR-X + 50 M: concretes with 50% recycled mixed sand (RMF) and a certain percentage of recycled coarse aggregate (X)).

line with the Visintin et al. [17] results, further to which in concretes with compressive strength of under 45 MPa, emissions abatement is attributable to replacing natural with recycled aggregate.

Despite the low contribution to CO<sub>2</sub> emissions abatement, the use of recycled aggregate affords other environmental benefits, such as the conservation of natural resources, the reduction of the impact of stockpiling and the extension of the life cycle of the materials involved.

The linear relationship between GWP and RCA ( $R^2 \sim 1$ ) is likewise obvious in Fig. 15. The correlation coefficient found here was greater than estimated by Braga et al. [15], who also worked with class C30/37 concretes but with a different composition (variable cement content...).

### 3.3.2. Eco-efficiency

Eco-efficiency, defined as the ratio between 28 d strength (compressive, splitting tensile and flexural strength) and CO<sub>2</sub>-eq emissions (GWP), for all the concrete mixes is graphed in Fig. 16. That parameter, the inverse of CO<sub>2</sub> intensity (kgCO<sub>2eq</sub>/ MPa\*m<sup>3</sup>), relates concrete eco-behaviour to technical performance [99]. The data show that the mixes bearing RMF (HR-X + 50 M) alone or in conjunction with recycled concrete coarse aggregate were less efficient than HP in terms of compressive strength, with values 1.2% lower for HR-0 + 50 M and 3.8% lower for HR-100 + 50 M. That finding is due to a combination of the minimal contribution of recycled aggregate to total CO<sub>2</sub> emissions and its adverse effect on compressive strength.

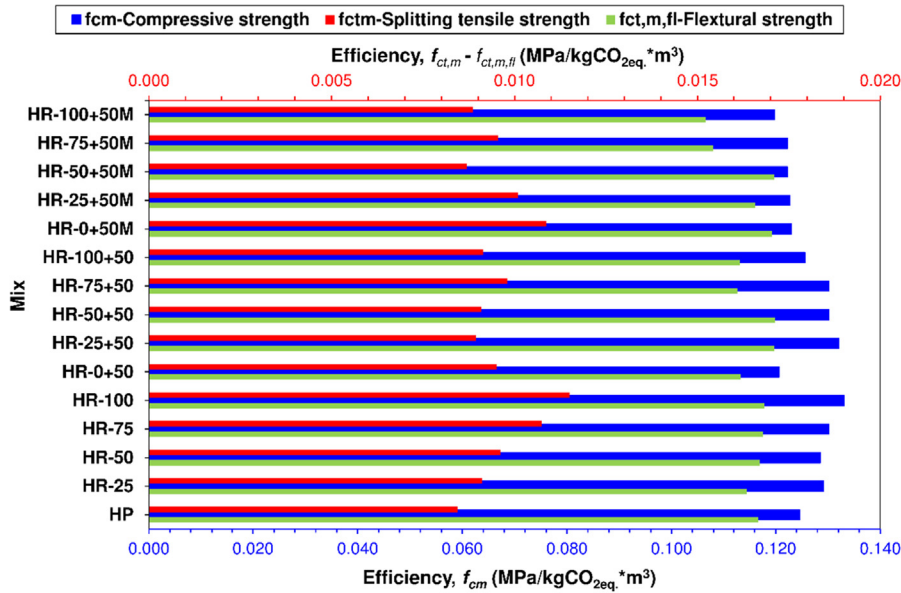


Fig. 16. Concrete eco-efficiency: (compressive ( $f_{cm}$ ), tensile ( $f_{ctm}$ ) and flexural ( $f_{ct,m,fl}$ )) strength / CO<sub>2</sub> emissions.

Concretes designed with recycled mixed fine and concrete coarse aggregate (HR-X + 50 M) or with recycled concrete coarse aggregate only (HR-X) exhibited greater efficiency than HP in terms of tensile strength and similar or greater efficiency respecting flexural strength for concrete coarse aggregate contents of 50% or less and 50% RMF (HR-0 + 50 M, HR-25 + 50 M and HR-50 + 50 M). The aforementioned findings are in line with the data observed by Alnahhal et al. [12], who noted that the environmental effect of using recycled aggregate is not always sufficient to counter its adverse impact on mechanical performance.

Most of the mixes bearing only recycled concrete coarse aggregate (HR-X), only recycled concrete fine (HR-0 + 50) or both jointly (HR-25 + 50, HR-75 + 50 and HR-100 + 50) exhibited higher efficiency (MPa/kg CO<sub>2eq.</sub> \*m<sup>3</sup>) than the reference for the mechanical characteristics analysed. The exceptions were mix HR-0 + 50 for compressive strength (~3.1% lower than HP) and mixes HR-

0 + 50, HR-75 + 50 and HR-100 + 50 for flexural strength (~3% lower than HP). That higher efficiency in the recycled concretes attests to the environmental and technical benefits of the new granular skeletons.

The efficiency values observed ( $f_{cm}$  (MPa)/kg CO<sub>2eq.</sub> \* m<sup>3</sup>) were similar to the 0.123 MPa/kg CO<sub>2eq.</sub> \* m<sup>3</sup> obtained by Alnahhal et al. [12] for conventional concretes ( $f_{ck}$  = 30 MPa,  $w/c_{effective}$  = 0.55, cement content = 380 kg/m<sup>3</sup>) and greater than the 0.112 MPa/kg CO<sub>2eq.</sub> \* m<sup>3</sup> reported by those authors for recycled concretes with 100% recycled concrete coarse aggregate.

GWP is plotted against compressive strength for the concretes tested in Fig. 17, which also shows the exponential regression with a 95% confidence interval for the upper (factor = 85) and lower (factor = 45) model coefficients [38].

$$GWP = factor * f_{cm}^{0.46} \tag{5}$$

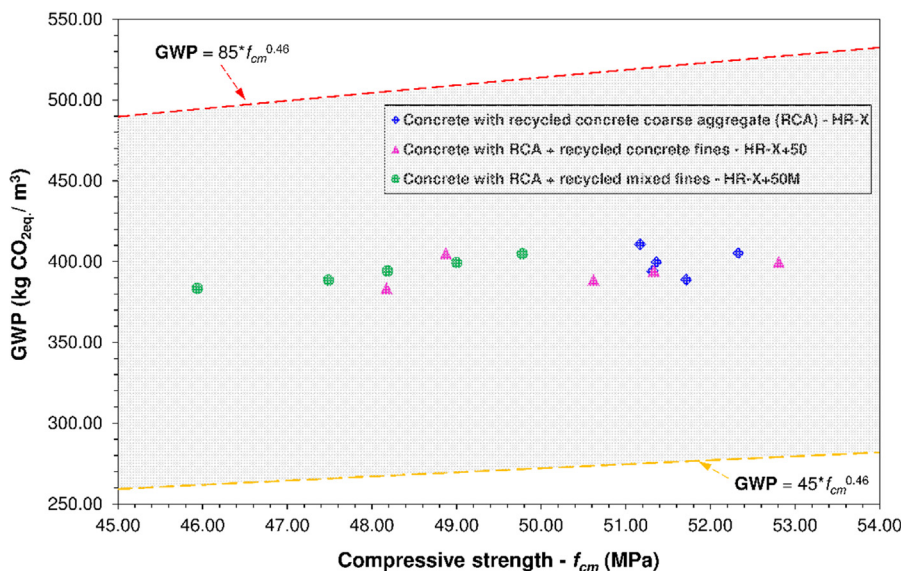


Fig. 17. GWP vs  $f_{cm}$  for recycled concretes.



Fig. 17 shows no clear relationship between GWP and  $f_{cm}$ , an indication that recycled coarse and recycled fine aggregates affect concrete characteristics differently. Kurda et al. [38] reached the same conclusion after analysing the two properties based on a review of the literature.

The experimental data for the materials analysed here, as for other concretes bearing recycled aggregate [38], lay between the upper (factor = 85) and lower (factor = 45) limits defined in Fig. 17.

#### 4. Conclusions

The conclusions drawn from the present study are listed below.

- Recycled concrete workability is not affected by the use of recycled aggregate, regardless of the nature or replacement ratio of the latter; all the mixes studied exhibited soft consistency.
- Fresh and hardened state density is lower in recycled than in conventional concrete and its density declines with rising recycled aggregate content, more steeply when recycled mixed aggregate is used.
- The use of small percentages (<25%) of concrete coarse aggregate alone or with recycled concrete fines lowers total porosity and refines the pore structure. Higher replacement ratios induce the opposite effect.
- Recycled concretes have lower 28 d compressive strength than the conventional material, although the decline was <17% in all the cases studied. Strength loss is greater in mixes bearing recycled mixed fines.
- Splitting tensile strength rises with the coarse aggregate replacement ratio and declines when recycled fines are used. All the values observed here were comparable to or even up to 10% greater than reference strength.
- Flexural strength is similar in conventional concrete and recycled concrete with <75% replacement. At higher percentages, the use of recycled materials in both fractions induces up to 15% strength loss.
- Recycled concretes bearing both recycled concrete coarse aggregate and recycled fines are apt for use in structural concretes with 30 MPa characteristic strength.
- The mathematical models recommended in Spanish structural concrete code EHE-08 for calculating splitting tensile and flexural strength from 28 d compressive strength must be corrected.
- The use of recycled aggregate lowers GWP linearly by 1.4% in HR-25 and by 7% in HR-100 + 50 M relative to total emissions attributable to HP.
- Partial replacement of natural aggregate with recycled concrete aggregate alone or in conjunction with RCF has a generally beneficial effect on eco-efficiency (ratio between compressive, splitting tensile, flexural strength and CO<sub>2</sub> emitted), with values similar to or higher than exhibited by HP. The use of recycled concrete coarse aggregate and RMF has a beneficial effect on eco-efficiency for splitting tensile strength (strength / CO<sub>2</sub> emissions ratio), whereas eco-efficiency is slightly lower (<3%) than in HP in terms of compressive and flexural strength.
- The benefits of using recycled coarse (GRC and RCC) and/or fine (RCF or RMF) aggregate to partially replace natural aggregate lies not only in CO<sub>2</sub> emissions abatement in concrete manufacture, but also in the significant mitigation of the environmental problems induced by stockpiling the respective waste.

#### CRedit authorship contribution statement

**P. Plaza:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft, Writing - review

& editing. **I.F. Sáez del Bosque:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - review & editing, Supervision. **M. Frías:** Conceptualization, Formal analysis, Writing - review & editing, Supervision. **M.I. Sánchez Rojas:** Conceptualization, Supervision, Methodology, Project administration, Funding acquisition, Writing - review & editing. **C. Medina:** Conceptualization, Supervision, Methodology, Project administration, Funding acquisition, Writing - review & editing.

#### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Acknowledgements

This study was funded under European Regional Development Fund (ERDF) Interreg-POCTEP research grant 0008\_ECO2CIR\_4\_E for the 'Project for cross-border cooperation to introduce the eco and circular economy by reducing waste generation and enhancing waste recycling, management and valorisation in Central Spain, Extremadura and Alentejo' and national project BIA2016-76643-C3-1-R. Funding was also provided by the Government of Extremadura and ERDF under grant GR 18122 awarded to the MATERIA research group. Pablo Plaza Caballero participated in the research under predoctoral grant PD18078 awarded by the Regional Department of the Economy and Infrastructures of Extremadura.

#### References

- [1] European Commission, Waste statistics, 2020. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics)
- [2] European Commission, EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth, 2010.
- [3] European Commission, The Paris Protocol - A blueprint for tackling global climate change beyond 2020, 2015.
- [4] European Commission, Next steps for a sustainable European future. European action for sustainability, 2016.
- [5] European Aggregates Association, Annual review 2018-2019: A sustainability industry for a Sustainable Europe, <http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-annual-review-2018-2019.pdf> [Accessed date: 2020/03/09], 2020.
- [6] A. Akhtar, A.K. Sarmah, Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective, *J. Cleaner Prod.* 186 (2018) 262–281.
- [7] C. Medina, W. Zhu, T. Howind, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas, Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes, *Constr. Build. Mater.* 79 (2015) 22–33.
- [8] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, A.I. Cimentada, C. Medina, Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 172 (2018) 618–625.
- [9] E. Asensio, C. Medina, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas, Fired clay-based construction and demolition waste as pozzolanic addition in cements, Design of new eco-efficient cements, *Journal of Cleaner Production* 265 (2020) 121610.
- [10] C. Medina, I.F. Sáez del Bosque, E. Asensio, M. Frías, M.I. Sánchez de Rojas, New additions for eco-efficient cement design, Impact on calorimetric behaviour and comparison of test methods, *Materials and Structures* 49 (2016) 4595–4607.
- [11] J. Antony, D.G. Nair, Potential of construction and demolished wastes as pozzolana, 1st global colloquium on recent advancements and effectual researches in engineering, *Sci. Technol. Raerest* 2016 (25) (2016) 194–200.
- [12] M.F. Alnahhal, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, F. Abutaha, M.A. Alqedra, R.R. Nayaka, Assessment on engineering properties and CO<sub>2</sub> emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *J. Cleaner Prod.* 203 (2018) 822–835.
- [13] R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review, *European J. Environ. Civ. Eng.* 19 (2015) 825–849.
- [14] B. Gonzalez-Fonteboa, S. Seara-Paz, J. de Brito, I. Gonzalez-Taboada, F. Martinez-Abella, R. Vasco-Silva, Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis, *Materiales De Construccion* 68 (2018).

- [15] A.M. Braga, J.D. Silvestre, J. de Brito, Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates, *J. Cleaner Prod.* 162 (2017) 529–543.
- [16] L.F. Jiménez, J.A. Domínguez, R.E. Vega-Azamar, Carbon footprint of recycled aggregate concrete, *Adv. Civ. Eng.* 2018 (2018) 7949741.
- [17] P. Visintin, T. Xie, B. Bennett, A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake, *J. Cleaner Prod.* 248 (2020) 119243.
- [18] J. de Brito, F. Agrela, R. V. Silva, in: *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, J. de Brito, F. Agrela, (Eds.) Woodhead Publishing: 2019; pp 509–526.
- [19] V.W. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), *Constr. Build. Mater.* 172 (2018) 272–292.
- [20] Y. Wang, H. Zhang, Y. Geng, Q. Wang, S. Zhang, Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate, *Constr. Build. Mater.* 215 (2019) 332–346.
- [21] S.K. Kirthika, S.K. Singh, A. Chourasia, Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review, *J. Cleaner Prod.* 122089 (2020).
- [22] H. Salahuddin, L.A. Qureshi, A. Nawaz, S.S. Raza, Effect of recycled fine aggregates on performance of Reactive Powder Concrete, *Constr. Build. Mater.* 243 (2020) 118223.
- [23] G. Puente de Andrade, G. de Castro Polisseni, M. Pepe, R.D. Toledo Filho, Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model, *Constr. Build. Mater.* 252 (2020) 119091.
- [24] R. Kumar, S.C.B. Gurram, A.K. Minocha, Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete, *Mag. Concr. Res.* 69 (2017) 1288–1295.
- [25] L.W. Zhang, A.O. Sojobi, V.K.R. Kodur, K.M. Liew, Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment, *J. Cleaner Prod.* 236 (2019) 117600.
- [26] Z. Guo, C. Chen, D.E. Lehman, W. Xiao, S. Zheng, B. Fan, Mechanical and durability behaviours of concrete made with recycled coarse and fine aggregates, *European J. Environ. Civil Eng.* 24 (2020) 171–189.
- [27] C.-C. Fan, R. Huang, H. Hwang, S.-J. Chao, Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes, *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 708–715.
- [28] L. Evangelista, J. de Brito, Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 397–401.
- [29] S. Ahmed, Properties of concrete containing recycled fine aggregate and fly ash, *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 40 (2014) 70–78.
- [30] M. Bravo, J. de Brito, J. Pontes, L. Evangelista, Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *J. Cleaner Prod.* 99 (2015) 59–74.
- [31] S.K. Kirthika, S.K. Singh, A. Chourasia, Performance of recycled fine-aggregate concrete using novel mix-proportioning method, *J. Mater. Civ. Eng.* 32 (2020) 04020216.
- [32] J. Sim, C. Park, Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate, *Waste Manage.* 31 (2011) 2352–2360.
- [33] L. Berredjem, N. Arabi, L. Molez, Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete, *Constr. Build. Mater.* 246 (2020) 118421.
- [34] M. Velay-Lizancos, I. Martínez-Lage, M. Azenha, J. Granja, P. Vazquez-Burgo, Concrete with fine and coarse recycled aggregates: E-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages, *Constr. Build. Mater.* 193 (2018) 323–331.
- [35] A. Lotfy, M. Al-Fayez, Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate, *Cem. Concr. Compos.* 61 (2015) 36–43.
- [36] K.-H. Yang, Y.-B. Jung, M.-S. Cho, S.-H. Tae, Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete, *J. Cleaner Prod.* 103 (2015) 774–783.
- [37] M.U. Hossain, C.S. Poon, I.M.C. Lo, J.C.P. Cheng, Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA, *Resour. Conserv. Recycl.* 109 (2016) 67–77.
- [38] R. Kurda, J. de Brito, J.D. Silvestre, A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete, *Journal of Building Engineering* 29 (2020) 101173.
- [39] A. Coelho, J. de Brito, Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal-Part I: Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions, *Waste Manage.* 33 (2013) 1258–1267.
- [40] European Committee for Standardization, EN 197-1. Cement, Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2001.
- [41] European Committee for Standardization, EN 206. Concrete. Specification, performance, production and conformity, 2018.
- [42] European Committee for Standardization, EN 933-11. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate, 2009.
- [43] D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista, Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete, *Constr. Build. Mater.* 71 (2014) 141–151.
- [44] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars, *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 179–186.
- [45] A.M. Wagih, H.Z. El-Karmoty, M. Ebid, S.H. Okba, Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete, *HBRC journal* 9 (2013) 193–200.
- [46] S. Kenai, F. Debieb, L. Azzouz, Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Thomas Telford Publish.* (2002) 383–392.
- [47] V. Corinaldesi, G. Moriconi, Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2869–2876.
- [48] D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista, Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties, *Constr. Build. Mater.* 154 (2017) 294–309.
- [49] H. Mefteh, O. Kebaili, H. Oucief, L. Berredjem, N. Arabi, Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete, *J. Cleaner Prod.* 54 (2013) 282–288.
- [50] European Committee for Standardization, EN 1097-6. Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption, 2013.
- [51] European Committee for Standardization, EN 933-8. Test for geometrical properties of aggregates. Part 8: Assessment of fines. Sand equivalent test, 2015.
- [52] European Committee for Standardization, EN 1097-2. Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation, 2010.
- [53] European Committee for Standardization, EN 933-3. Test for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape. Flakiness index, 2012.
- [54] European Committee for Standardization, EN 1744-1. Tests for chemical properties of aggregates. Part 1: Chemical analysis, 2009.
- [55] Spanish Committee for Standardization, UNE 146508. Test for aggregates. Determination of the alkali-silica and alkali-silicate potential reactivity of aggregates. Accelerated mortar bar test 2018.
- [56] Z. Peng, C. Shi, Z. Shi, B. Lu, S. Wan, Z. Zhang, J. Chang, T. Zhang, Alkali-aggregate reaction in recycled aggregate concrete, *J. Cleaner Prod.* 255 (2020) 120238.
- [57] D.C. Teychené, R.E. Franklin, H.C. Erntroy, *Design of normal concrete mixes*, IHS BRE Press, Garston, Watford, 2010.
- [58] Ministry of Public Works, Code on Structural Concrete (EHE-08), Madrid, 2008, pp. 704.
- [59] European Committee for Standardization, EN 12620. Aggregates for concrete, 2008.
- [60] European Committee for Standardization, EN 12350-6. Testing fresh concrete. Part 6: Density, 2020.
- [61] European Committee for Standardization, EN 12350-7. Testing fresh concrete. Part 7: Air content. Pressure methods, 2020.
- [62] European Committee for Standardization, EN 12350-2. Testing fresh concrete. Part 2: Slump-test, 2020.
- [63] European Committee for Standardization, EN 12390-7. Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete, 2020.
- [64] European Committee for Standardization, EN 12390-3. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens, 2020.
- [65] European Committee for Standardization, EN 12390-6. Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, 2020.
- [66] European Committee for Standardization, EN 12390-5. Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens, 2020.
- [67] American Society for Testing and Materials, D 4404-84: Test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry, 2004.
- [68] J.Z. Xiao, J.B. Li, C. Zhang, Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1187–1194.
- [69] I.F. Saez del Bosque, W. Zhu, T. Howind, A. Matias, M.I. Sanchez de Rojas, C. Medina, Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate, *Cem. Concr. Compos.* 81 (2017) 25–34.
- [70] C. Medina, W.Z. Zhu, T. Howind, M.I. Sanchez De Rojas, M. Frías, Influence of interfacial transition zone on engineering properties of the concrete manufactured with recycled ceramic aggregate, *Journal of Civil Engineering and Management* 21 (2015) 83–93.
- [71] B. Cantero, I.F. Saez del Bosque, A. Matias, C. Medina, Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of structural concretes, *Constr. Build. Mater.* 185 (2018) 93–101.
- [72] H. Yaprak, H.Y. Aruntas, I. Demir, O. Simsek, G. Durmus, Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties, *Int. J. Phys. Sci.* 6 (2011) 2455–2461.
- [73] G. Dimitriou, P. Savva, M.F. Petrou, Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 228–235.
- [74] M. N. Soutsos, *Concrete durability: a practical guide to the design of durable concrete structures*, Thomas Telford, London, 2010, pp. xiv, 585 p.
- [75] J.M. Gomez, L. Agullo, E. Vazquez, Relationship between porosity and concrete properties with natural aggregate replacement by recycled concrete aggregate, *Canadian Society Civil Engineering*, Montreal, 2001, pp. 147–156.
- [76] S.-C. Kou, C.-S. Poon, M. Etxeberria, Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 286–291.
- [77] J.M.V. Gómez-Soberón, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1301–1311.
- [78] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, E. Wirquin, Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 223–232.



- [79] P. Kumar Metha, P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, Third Edition ed., McGraw-Hill, United States of America, 2006, pp. 659.
- [80] K. Rahal, *Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*, *Build. Environ.* 42 (2007) 407–415.
- [81] H. Zhang, Y.-Y. Wang, D.E. Lehman, Y. Geng, *Autogenous-shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate*, *Cem. Concr. Compos.* 103600 (2020).
- [82] A.G. Khoshkenari, P. Shafiqh, M. Moghimi, H. Bin Mahmud, *The role of 0–2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete*, *Mater. Des.* 64 (2014) 345–354.
- [83] J.M. Khatib, *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 763–769.
- [84] M. Etxeberria, E. Vazquez, A. Mari, M. Barra, *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 735–742.
- [85] S.C. Kou, C.S. Poon, *Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates*, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 622–627.
- [86] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC*, *Cem. Concr. Compos.* 24 (2002) 269–279.
- [87] X. Li, *Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I, Material behaviour of recycled aggregate concrete*, *Resources, Conservation and Recycling* 53 (2008) 36–44.
- [88] J.-Z. Xiao, J.-B. Li, C. Zhang, *On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview*, *Mater. Struct.* 39 (2006) 655–664.
- [89] A. Katz, *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 703–711.
- [90] A. Committee, I. O. f. Standardization, *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*, American Concrete Institute, 2008.
- [91] R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, *Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete*, *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 108–118.
- [92] B. González-Fonteboa, S. Seara-Paz, J. De Brito, I. González-Taboada, F. Martínez-Abella, R. Vasco-Silva, *Recycled concrete with coarse recycled aggregate, An overview and analysis*, *Materiales de construcción* 68 (2018) 151.
- [93] R. Senthamarai, P.D. Manoharan, D. Gobinath, *Concrete made from ceramic industry waste: durability properties*, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2413–2419.
- [94] M. Malešev, V. Radonjanin, S. Marinković, *Recycled concrete as aggregate for structural concrete production*, *Sustainability* 2 (2010) 1204–1225.
- [95] I.B. Topcu, S. Şengel, *Properties of concretes produced with waste concrete aggregate*, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1307–1312.
- [96] M. Schneider, *The cement industry on the way to a low-carbon future*, *Cem. Concr. Res.* 124 (2019) 105792.
- [97] A.P. Gursel, H. Maryman, C. Ostertag, *A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash*, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 823–836.
- [98] A. Hanif, Y. Kim, Z. Lu, C. Park, *Early-age behavior of recycled aggregate concrete under steam curing regime*, *J. Cleaner Prod.* 152 (2017) 103–114.
- [99] H.S. Müller, M. Haist, M. Vogel, *Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime*, *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 321–337.

Article

# Recycled Eco-Concretes Containing Fine and/or Coarse Concrete Aggregates. Mechanical Performance

Pablo Plaza <sup>1,\*</sup>, Isabel Fuencisla Sáez del Bosque <sup>1</sup>, Javier Sánchez <sup>2</sup> and César Medina <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Engineering, University of Extremadura, UEx-CSIC Partnering Unit, Institute for Sustainable Regional Development (INTERRA), 10003 Cáceres, Spain; isaездelu@unex.es

<sup>2</sup> Eduardo Torroja Institute for Construction Science, Spanish National Research Council (CSIC), 28033 Madrid, Spain; javier.sanchez@csic.es

\* Correspondence: pablopc@unex.es (P.P.); cmedinam@unex.es (C.M.)

**Abstract:** This study analysed the effect of substituting different percentages of natural aggregate with recycled aggregate from concrete crushing, using a coarse fraction as well as a fine fraction. Natural and recycled materials were classified in order to analyse the mechanical performance and impermeability of these eco-concretes in the fresh state as well as in the hardened state. A statistical analysis also determined whether the performance loss was significant from a statistical point of view, finding strength decreases of less than 13% in compressive strength and losses of less than 20% in flexural strength. An increasing trend was found in permeability as the percentage of recycled aggregate in the mix increased.

**Keywords:** mechanical performance; coarse and fine recycled aggregates; permeability; fresh-state concrete properties

**Citation:** Plaza, P.; Sáez del Bosque, I.F.; Sánchez, J.; Medina, C. Recycled Eco-Concretes Containing Fine and/or Coarse Concrete Aggregates: Mechanical Performance.

*Appl. Sci.* **2024**, *14*, 3995.

<https://doi.org/10.3390/app14103995>

Academic Editors: Mouhamadou Amar and Nor Edine Abriak

Received: 27 March 2024

Revised: 1 May 2024

Accepted: 5 May 2024

Published: 8 May 2024



**Copyright:** © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

The construction sector has a high demand for natural resources and is one of the activities that generates the largest amount of waste during all phases of the construction process (construction, maintenance and demolition). Throughout the EU specifically, the amount of waste generated in the construction sector has been increasing in recent years. According to Eurostat [1], a total of 6.81 Gt of waste was generated in the period from 2004–2020 in the construction sector in the EU-27 as a whole, increasing its magnitude year by year, rising from 29.66% of total waste in 2004 to 37.11% in 2020.

The construction sector also has high CO<sub>2</sub> emissions in the extraction, raw material manufacturing and transport processes and high energy consumption. It is estimated that the construction sector is globally responsible for 33% of annual CO<sub>2</sub> emissions [2] and 40% of global energy consumption [3]. The high energy consumption and emissions are due to manufacturing concrete components, especially cement, which accounts for 73% of total emissions in the sector [4], and transporting these components.

In this context, the use of recycled materials can be a great advantage in logistical terms, since the distance of transporting raw materials is reduced by having construction and demolition waste territory that can be converted into recycled aggregates available throughout the [5], especially in areas where natural aggregate is scarce and/or impossible to extract [6]. The impact on the environment is also significantly reduced by reducing the exploitation of natural resources in quarries as well as waste deposits in landfills [7]. As a whole, the use of coarse recycled aggregate can reduce greenhouse gas emissions by up to 65% [8], a percentage that could increase even further if fine aggregate is added, which would be advantageous, since sand consumption worldwide is increasing year by year, with an estimate of 47.5 billion tonnes by 2023 [9] and up to 60 billion tonnes by 2030 [10].

However, the main problem in the use of recycled aggregates for manufacturing concrete is limitations at the regulatory level, which restrict the use of recycled aggregates, in most cases enabling substitution percentages of less than 60% for the coarse fraction of recycled aggregate from concrete crushing. Table 1 shows the amount of recycled concrete aggregate permitted within the different international regulations, indicating the permitted granulometric fraction (coarse or fine), maximum substitution percentage and maximum strength class.

**Table 1.** Regulatory framework for the use of recycled aggregates in concrete manufacture.

Country	Aggregate Type	Fraction	Max. Substitution (%)	Concrete Type	Strength Class
Australia AS 1141.62/HB 155:2002 [11]	RCA (Class 1A)	Coarse	30	Structural	C40/50
China GB/T-25177 [12]	RCA—Type I	Coarse	100	Structural	No limit
	RCA—Type II		30	Structural	C40/50
	RCA—Type III		30	Structural	C25/30
	RCA—Type I	Fine	100	Structural	C40/50
	RCA—Type II		30	Structural	C25/30
	RCA—Type III		30	Non structural	-
Korea KS-F-2573 [13]	RCA	Coarse	30	Structural	27 MPa
		Coarse + Fine	30	Non structural	21 MPa
Hong Kong CS-3:2013/HKBD 2009/WBTC- No. 12 [14]	RCA	Coarse	20	Structural	C25/30– C35/45
			100	Non structural	
Japan JIS-5021 [15]/JIS-5022 [16]/JIS- 5023 [17]	RCA—HQ	Coarse	100	Structural	C45/55
		Fine	100		
	RCA—MQ	Coarse	100	Structural	C35/45
		Fine	100		
RCA—LQ	Coarse	No limit	Non structural	-	
	Fine				
Belgium PTV 406-2003 [18]/NBN B 15- 001 [19]	RCA—Type A	Coarse	50, 30, 20	Structural	C30/37
Germany DIN 4226-101, DAfStb [20]	RCA—Type A	Coarse	45, 35, 25	Structural	C30/37
Italy NTC-2008 [21]	RCA 1	Coarse	30	Structural	C30/37
			60		C25/30
			15		C45/55
Denmark DS 2426/DCA No. 34 [22]	RCA 1	Coarse	100	Structural	C40/50
	RCA 2	Coarse and fine	100		
Netherlands NEN-5905 [23]	RCA	Coarse	20	Structural	C55/67
Portugal LNEC-E471 [24]	RCA 1	Coarse	25	Structural	C40/50
Switzerland MB-2030 [25]	RCA 1	Coarse	100	Structural	No limit
	RCA 2		100		
United Kingdom BS 8500-2 [26]	RCA	Coarse/Fine	20	Structural	C40/50
France NF P 18-545 [27]	RCA 1	Coarse	60, 30, 20	Structural	No limit
	RCA 2		40, 15		

Spain	RCA	Coarse	20	Structural	C40/50
Structural Code [28]			100	Non structural	-
EN 206 [29]	RCA	Coarse	50, 30	Structural	No limit
RILEM	RCA	Coarse	100	Structural	C50/60
Brazil	RCA	Coarse/Fine	100	Non structural	-
NBR 15116 [30]					

There are numerous works that have studied the use of recycled aggregates from concrete crushing in structural concrete manufacture. Jayasuriya [31] statistically analysed a large database with experimental results of concretes that included a coarse fraction of recycled concrete aggregates, reaching the following conclusions: (i) the optimal substitution percentage is below 20%, where the best properties in concrete are obtained; (ii) although strength losses occur as the substitution percentage and the use of homogeneous aggregates increases (as in the case of total substitution), it provides better results as the entire fraction has the same properties; (iii) the strength of concrete with recycled aggregates is affected by an increase in the effective water/cement ratio; and (iv) fracture behaviour is unpredictable due to the notable differences in rigidity within the concrete matrix, on which point further study is required.

Several authors also conclude that recycled concrete aggregates can also be used regardless of the fraction and substitution percentage if optimal quality of the new concrete is achieved. Etxeberria [32] maintains that recycled coarse aggregate can be used for concrete in medium–low-strength concrete (20–45 MPa) even if strength variations of up to 25% are recorded for total substitution of natural coarse aggregate by concrete aggregate. Limiting strength makes it possible to avoid an increase in the amount of cement, which would be counter-productive from an economic and environmental point of view. Along the same lines, McNeil [33] maintains that although there are differences in behaviour, the requirements specified in structural standards are met in real structures, which means that recycled aggregates can be used in structural concrete even if the quality is slightly lower. If the fine fraction is also substituted with recycled concrete sand, the strength reduction is often greater, since the fine fraction has greater influence on strength than the coarse fraction. Tang [34] analysed the properties of concrete with 100% recycled aggregates, observing losses of up to 28.6% for total substitution of both fractions. Regarding other properties, the elastic modulus and tensile strength have similar behaviour, with losses of between 20% and 33% depending on the amount of recycled aggregate and the fraction chosen. Along the same lines, Kenai [35] observed decreases in all the mechanical properties of concrete using recycled aggregates until reaching total substitution. The decrease in compressive strength, of approximately 50% in concrete completely composed of recycled aggregates, presents a considerably greater water demand, mainly because the recycled aggregate has greater absorption. This behaviour can be explained by analysing the microstructure of the concrete. Several authors [36,37] maintain that the performance loss of concrete with recycled aggregate is due to lower-strength ITZ between the mortar layer adhering to the recycled aggregate and the mortar that is formed while mixing the concrete. The cracks and pores present in this layer of old mortar make it the weakest point of the new concrete, which also has a greater demand for water due to the increased absorption of this layer of mortar [38].

The variability of results mentioned above lies in the difference in the quality of the recycled aggregates depending on the concrete of origin. Kumar [39] observed that the use of aggregates from medium–low-strength (30 MPa) but high-quality concrete did not affect the strength for substitution percentages of up to 20%. On the contrary, substituting the coarse and fine fractions, separately as well as together, obtained slightly higher strengths with small adjustments in the dosage, obtaining a high-performance concrete (HPC). Other authors have also observed recycled concrete that is more resistant than the reference mixes in the long term, using a coarse fraction to completely substitute the

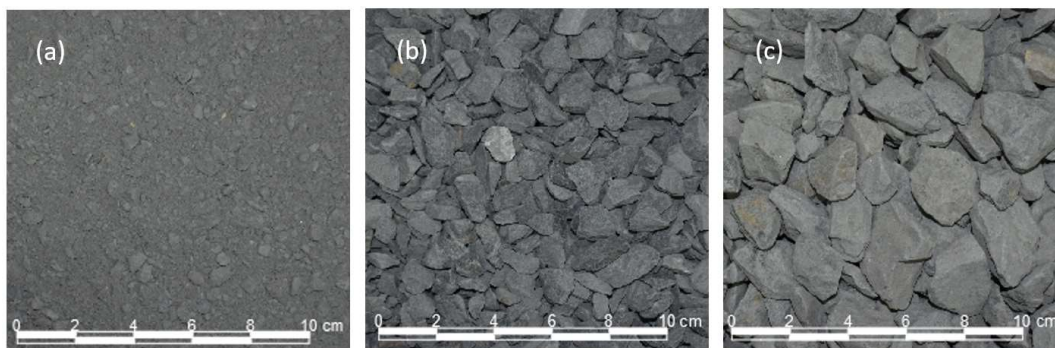
natural aggregate [40] as well as both fractions, substituting the fine fraction in lower percentages [41], defining the optimal percentage below 60% [42].

This work attempts to deepen the study of the physical/mechanical behaviour of concrete that simultaneously includes coarse and fine aggregate from concrete crushing. Specifically, this work analyses the effect of partially (25, 50 and 75%) or totally (100%) substituting the coarse fraction of the natural aggregate with recycled aggregate and at the same time partially substituting (10, 20 and 50%) the fine fraction of the aggregate in the design of class C30/37 structural concretes (characteristic strength of 30 N/mm<sup>2</sup>). The properties in the fresh state (density, consistency and entrained air) and hardened state (compressive and flexural strength and water penetration under pressure) of the concrete have thus been studied. These results have been analysed from a statistical point of view using two techniques: in the case of density, a linear regression model was studied based on the total percentage of substituted aggregate and in the rest of the properties, an analysis of the variance (ANOVA) with two factors and interaction, which analyses the relative effects and interferences of substituting the coarse and fine fractions separately as well as simultaneously, indicating which changes in the properties studied are significant from a statistical point of view.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials

The natural aggregate used to manufacture the concrete comes from crushing greywacke (Figure 1). It has an irregular shape and marked edges and is supplied in three granulometric fractions: 0/6 mm (finely crushed stone, CS-F), 6/12 mm (medially crushed stone, CS-M) and 12/20 mm (coarsely crushed stone, NG-C). Regarding its chemical composition, it is a siliceous aggregate with around 60% SiO<sub>2</sub>, as well as other oxides in a smaller proportion (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO and Na<sub>2</sub>O). From the mineralogical point of view it is characterised by having quartz, feldspars and phyllosilicates.



**Figure 1.** (a) Finely crushed stone (CS-F); (b) medially crushed stone (CS-M); (c) coarsely crushed stone (CS-C).

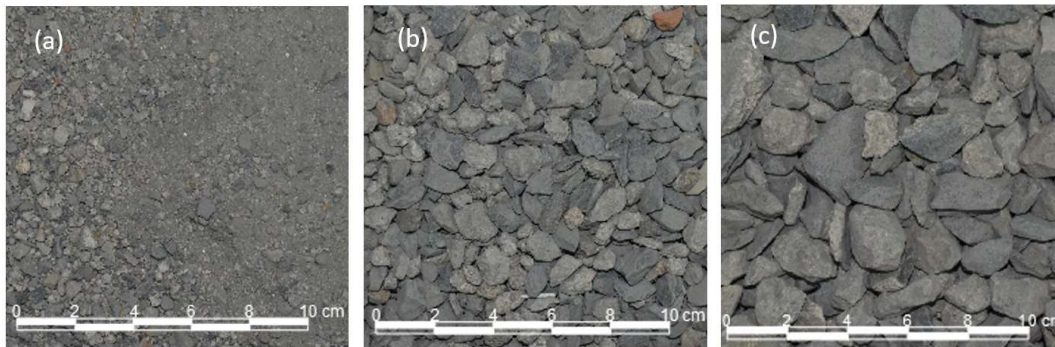
Also, the recycled aggregate comes exclusively from crushing concrete (Figure 2). As with natural aggregates, it is supplied in three granulometric fractions: 0/6 mm (recycled concrete sand, RCF), 6/12 mm (recycled crushed gravel, RCG) and 12/20 mm (recycled crushed concrete, RCC).

All aggregates were supplied by ARAPLASA, an aggregate recycling plant located in Plasencia, north of the province of Cáceres (Spain).

The Portland cement used was a CEM I 42.5 R supplied by the Lafarge Holcim plant located in Villaluenga de la Sagra, in the Spanish province of Toledo. This cement meets all the requirements of the EN-197 standard [43].

Finally, the super-plasticising additive FUCHS BRYTEN NF supplied by FUCHS Lubricantes S.A.U. (Barcelona, Spain) was used, which consists of a modified water-based

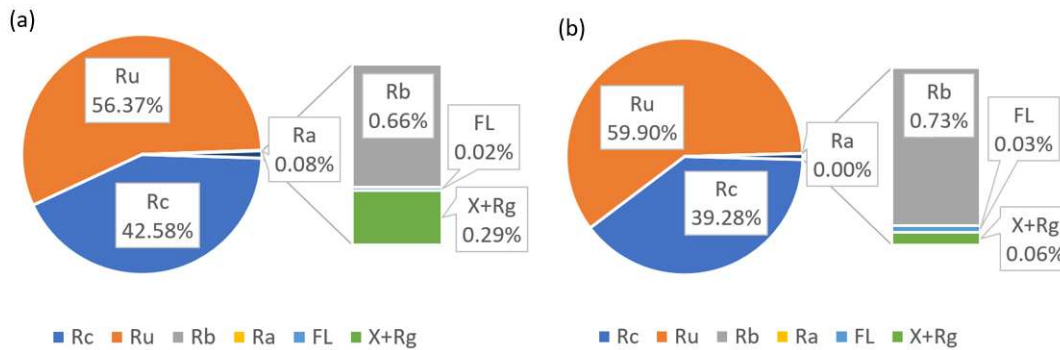
polycarboxylate. This brown additive is free from chlorides and has a density of 1.1 g/cm<sup>3</sup>, pH = 8.0 and 20% solids content.



**Figure 2.** (a) Recycled Concrete Sand (RCS); (b) Recycled Concrete Gravel (RCG) and (c) Recycled Crushed Concrete (RCC).

2.2. Aggregate Characterisation

Figure 3 shows the composition of gravel and fine gravel recycled from concrete, respectively. It shows that regardless of the recycled coarse fraction, the content of concrete or mortar (Rc) and unbound aggregates (Ru) is ≥95% by weight. Based on this result and according to the classification proposed by the Structural Code (Code), they can be classified as aggregates from concrete crushing (Rc+Ru ≥ 95%).



**Figure 3.** Classification for the constituents of coarse recycled aggregate. (a) RCG, (b) RCC (EN 933-11) [44].

Table 2 shows the physical, chemical and mechanical properties of the aggregates used in the formulation of concrete, as well as the EN 12620 standard requirements [45].

**Table 2.** Physical, chemical and mechanical properties of the aggregates.

Property [Standard]	CS-F	RCF	CS-M	CS-C	RCG	RCC	EN 12620
Density (Mg/m <sup>3</sup> ) [46]	2.82	2.79	2.78	2.77	2.72	2.73	-
Sorptivity (wt%) [46]	1.18	4.42	0.88	0.78	5.40	3.63	<5
Fine equivalent (wt%) [47]	73	61	-	-	-	-	>70 *
LA coefficient (wt%) [48]	-	-	16	18	27	27	≤40
Flakiness index (wt%) [49]	-	-	20.36	24.79	16.08	20.85	<35
Water-soluble chlorides (wt%) [50]				<0.01			<0.05
Acid soluble sulphates (wt%) [50]				<0.002			<0.80
Total sulphates (wt%) [50]				<0.001			<1

\* Aggregates intended for concrete elements exposed to exposure class X0 or XC. Note: CS-F: natural sand, RCF: recycled sand, CS-M: natural gravel—medium, CS-C: natural gravel—coarse, RCG: recycled gravel—medium, RCC: recycled gravel—coarse.



In terms of density, the values of the recycled aggregates are lower than those of natural aggregates, with a decrease of 1.44%, 2.16% and 1.06% for the coarse aggregate (RCC), the medium (RCG) and the fine (RCF), respectively. This decrease is mainly due to the adhered mortar layer present in this type of recycled aggregate, which is less dense and more porous than natural aggregate. The values obtained are similar to those observed by Andreu [51] and Gao [52], who observed values of 5.21% and 4.50%, respectively, for recycled concrete aggregates.

Water absorption of recycled aggregates is between 3.5 and 6 times greater than that of natural aggregates depending on the fraction, coarse or fine, analysed. In all cases however, the provisions of the Structural Code are complied with, which limits the absorption value to 7% for recycled aggregates and 4.5% for natural aggregates. Additionally, the granular skeleton has a water absorption of less than 5% by weight, the maximum limit imposed by the EN 12620 standard. The values obtained are similar to those reported by other authors [51,53,54], who observed values of 3.74% and 5.91%, respectively, for all the recycled concrete aggregate fractions studied.

Regarding the values obtained from the Los Angeles (LA) coefficient, the recycled coarse fractions have a value slightly higher proportion (27% by weight) than that corresponding to the natural fraction (16–18%) due especially to the lower resistance to fragmentation of the adhered mortar, which is more friable than natural aggregates. However, the recorded values are below the 40% by weight (LA40) and 50% by weight (LA50) required for recycled concrete crushing aggregates by the CodE and recycled concrete aggregates type A and B pursuant to the EN 206 standard, respectively. The values obtained are also similar [53], although Andreu [51] observed very low values (10–16%) analysing recycled aggregates from high-strength concrete.

Regarding chemical properties, it should be noted that all aggregates comply with the Structural Code limitations regarding the content of organic matter, water-soluble chlorides and sulphates, including total as well as acid-soluble.

Regarding geometric properties, the flakiness index of recycled aggregates is lower than that of natural aggregates, due to its more rounded shape and less sharp edges (see Figure 2) associated with the construction and demolition waste crushing process and the presence once again of adhered mortar. These values are below the 35% required in the CodE and are similar to those found by other authors [51,53]. Additionally, regarding the quality of the fines, the sand equivalent of the recycled aggregate (RCF) is lower than the minimum required by the CodE for the 0/4 fraction used in concrete elements exposed to exposure classes X0 and XC.

Figure 4 shows the granulometric distribution of the aggregates used, as well as the upper, lower and fine limit content (<0.063 mm) established in the CodE for the fine fraction, observing that all granulometric fractions 0/6, 6/12 and 12/22, regardless of their nature (natural or recycled), have a similar granulometric distribution.

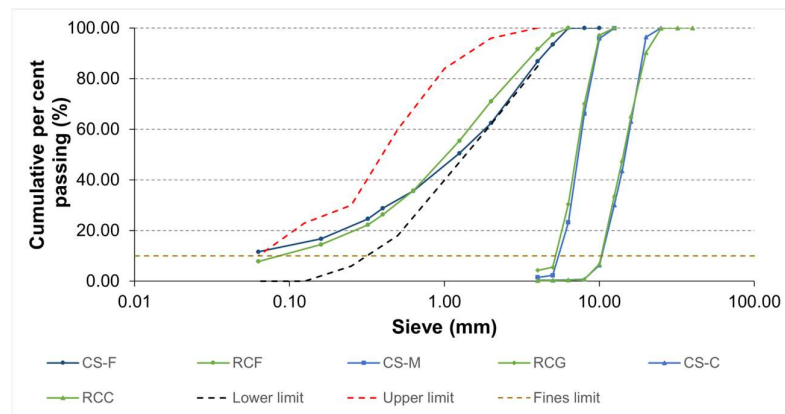


Figure 4. Aggregate particle size distribution.

Finally, the fine content (<0.063 mm) of the natural aggregate (CS-F) is 11.59%, slightly over the limit established for concrete with non-limestone aggregates subject to general exposure classes X0 or XC and not subject to any specific XA, XF or XM exposure class. In the case of recycled sand (RCF), the fine content is 7.78%.

### 2.3. Mix Design

Table 3 shows the composition of the 20 formulated mixes: (i) 1 reference mix (HP) with 100% natural aggregate; (ii) 4 mixes with recycled coarse aggregate in different percentages (25%, 50%, 75% and 100%) and 0% recycled sand (HR-25, HR-50, HR-75 and HR-100); (iii) 5 mixes with recycled coarse aggregate in different percentages (0%, 25%, 50%, 75% and 100%) and 10% recycled sand (HR-0+10, HR-25+10, HR-50+10, HR-75+10 and HR-100+10); (iv) 5 mixes with recycled coarse aggregate in different percentages (0%, 25%, 50%, 75% and 100%) and 20% recycled sand (HR-0+20, HR-25+20, HR-50+20, HR-75+20 and HR-100+20); and (v) 5 mixes with recycled coarse aggregate in different percentages (0%, 25%, 50%, 75% and 100%) and 50% recycled sand (HR-0+50, HR-25+50, HR-50+50, HR-75+50 and HR-100+50).

The starting data required to design the mixes according to the DOE British Method [55] were: (i) characteristic design strength ( $f_{ck}$ ) of 30 MPa (C30/37); (ii) effective water-to-cement ratio (w/c) of 0.45; and (iii) 20 mm maximum size of the coarse aggregate. It is also considered that the aggregates are dry, and 70% of the water absorption of the recycled aggregates has been added to the theoretical water content resulting from the dosing process, thus guaranteeing that all mixes have the same amount of water available for cement hydration regardless of the aggregate mix. For manufacturing all the mixes, a super-plasticising additive (6.20 kg/m<sup>3</sup>) was also added with an amount of 1.55% by weight of cement.

**Table 3.** Mix batching.

Mix	Components (kg/m <sup>3</sup> )							
	NS	RS	NG-M	NG-C	RG-M	RG-C	Cement	Water
HP	732.36	0.00	382.96	766.69	0.00	0.00	400.00	193.03
HR-0+10	655.65	70.59	380.95	762.65	0.00	0.00	400.00	195.20
HR-0+20	581.26	140.81	379.94	760.63	0.00	0.00	400.00	197.40
HR-0+50	360.4	349.21	376.92	754.58	0.00	0.00	400.00	203.93
HR-25	724.65	0.00	284.20	568.96	92.01	186.72	400.00	197.37
HR-25+10	648.72	109.24	282.69	565.94	91.52	185.72	400.00	202.36
HR-25+20	576.64	218.48	282.69	565.94	91.52	185.72	400.00	206.34
HR-25+50	358.47	347.35	281.18	562.91	184.73	281.18	400.00	209.38
HR-50	716.94	0.00	187.45	375.27	182.06	369.46	400.00	203.86
HR-50+10	643.51	108.37	186.95	374.26	181.57	368.47	400.00	207.72
HR-50+20	572.01	216.73	186.95	374.26	181.57	368.47	400.00	211.67
HR-50+50	354.62	343.61	185.43	371.24	180.10	365.49	400.00	214.55
HR-75	711.16	0.00	92.97	186.12	270.88	549.72	400.00	209.18
HR-75+10	638.31	68.72	92.72	185.62	270.15	548.23	400.00	211.29
HR-75+20	567.38	137.44	92.72	185.62	270.15	548.23	400.00	213.49
HR-75+50	349.80	338.94	91.46	183.10	266.48	540.79	400.00	219.48
HR-100	701.52	0.00	0.00	0.00	356.29	723.03	400.00	214.20
HR-100+10	627.90	67.60	0.00	0.00	356.29	723.03	400.00	216.15
HR-100+20	556.59	134.83	0.00	0.00	353.35	717.07	400.00	218.19
HR-100+50	345.94	335.21	0.00	0.00	351.39	713.10	400.00	224.40

Finally, all mixes meet the minimum dosage requirements (maximum water/cement ratio and minimum cement content) specified in article 43.2.1 of the Code for use as structural concrete for exposure classes XC1/XC2 and XC3/XC4 with maximum water/cement ratio of 0.60 and 0.55, respectively. Regarding the minimum cement content, a value of 275 kg/m<sup>3</sup> and 300 kg/m<sup>3</sup> of cement is established for classes XC1/XC2 and XC3/XC4, respectively.



### 2.4. Experimental

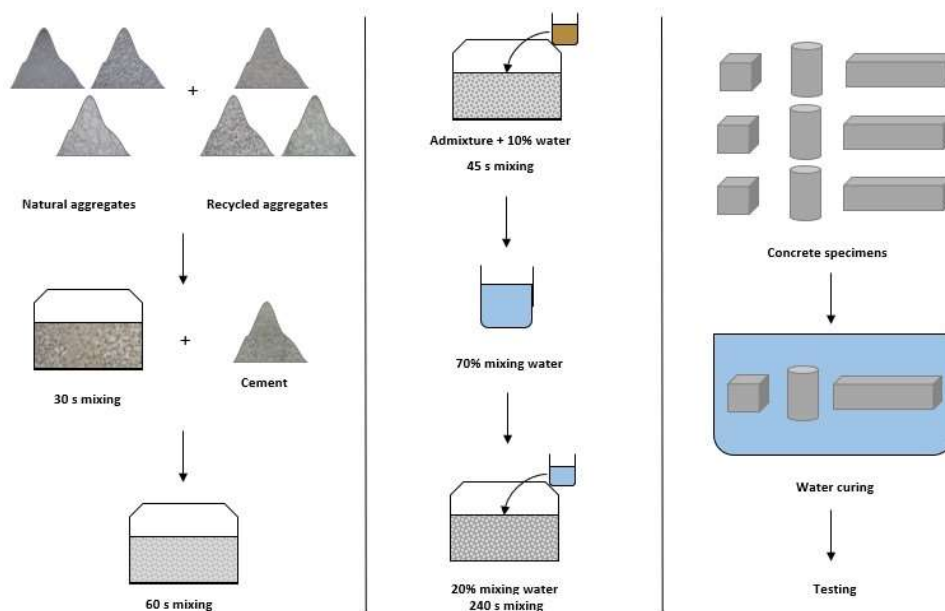
Prior to the design of the different mixes, the physical, mechanical and chemical properties (see point 2.2) of the aggregates used in this research were analysed. Next, the concrete mixes previously described were theoretically formulated (see Section 2.3) and adjusted on a laboratory scale. The properties of the manufactured concrete (see Table 4) were then studied in their fresh state (density, entrained air and consistency) and in their hardened state (density, compressive and flexural strength and water penetration under pressure) (see Table 4).

**Table 4.** Concrete properties studied.

Property	Standard	Sample Size (cm)	NS/M	Testing Age (Days)
Fresh state				
Density	EN 12350-6 [56]	Evaluated during the manufacturing process		
Entrained air	EN 12350-7 [57]			
Consistency	EN 12350-2 [58]			
Hardened state				
Density	EN 12390-7 [59]	15 × 15 × 15	3	28
Compressive strength	EN 12390-3 [60]	15 × 15 × 15	9	7, 28, 90
Flexural strength	EN 12390-5 [61]	10 × 10 × 40	3	28
Water penetration under pressure	EN 12390-8 [62]	Ø15 × 30	3	28

Note: NS/M: number of samples/mix.

Figure 5 shows the procedure followed for mixing the designed mixes, manufacturing and subsequent curing of the samples. The first phase of the mixing process consists of loading and homogenising the materials. To do so, the granular skeleton consisting of the aggregates was first placed into the mixer and then mixed for 30 s. The cement was then added, mixing for another 60 s. The second phase consists of the mixing itself, which begins by diluting the additive in 10% of the mixing water. This mix is added to the mixer for 45 s, after which 70% of the mixing water is added. Finally, the remaining 20% is added, and everything is mixed for 240 s. Finally, the third phase consists of filling the moulds and compacting them by chopping with a bar as established by the EN 12390-1 standard [63].



**Figure 5.** Mixing process.

### 2.5. Statistical Analysis

To evaluate the influence of replacing natural aggregate with recycled aggregate on concrete properties, two different techniques were used, depending on the property studied. First, to study the mechanical properties of the concrete, an analysis of variance (ANOVA) was carried out for each property and age studied, carrying out a total of four analyses. The statistical software “R”, version 4.0.5, was used to make the calculations.

The proposed model (Equation (1)) to carry out the analyses corresponds has two factors (% substitution of coarse aggregate and % substitution of fine aggregate) and interactions.

$$Y_{ijk} = \mu_{11} + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}, i = 1, \dots, 4; j = 2; k = 1, \dots, 3 \tag{1}$$

This model obtains a value for the response variable  $Y_{ijk}$  (strength studied in each case) by adding different values: (i)  $\mu_{11}$  is the average value corresponding to the reference mix (HP) in each case; (ii)  $\alpha_i$  quantifies the relative effect corresponding to the first factor (% coarse aggregate substitution); (iii)  $\beta_j$  quantifies the relative effect corresponding to the second factor (% fine aggregate substitution); (iv)  $\alpha\beta_{ij}$  is the relative effect due to the interaction that occurs when simultaneously substituting both fractions; and (v)  $\varepsilon_{ijk}$  indicates the perturbation of the model.

To check whether the analyses carried out are valid, the homoscedasticity and normality assumptions must first be checked using the Bartlett and Shapiro–Wilk tests, respectively. Table 5 shows the  $p$ -values of both tests. As can be seen, both assumptions are met in all analyses, so the analyses are therefore considered valid.

**Table 5.** Homoscedasticity and normality tests.

Contrast Type	Compressive			Flexural	Water under Pressure
	7 Days	28 Days	90 Days		
Bartlett	0.456	0.803	0.381	0.605	0.075
Shapiro–Wilk	0.237	0.627	0.556	0.231	0.532

Once the initial assumptions were tested, the model calculates the model coefficients, indicating whether or not these values are significant. In other words, for what percentages of substitution is strength variation relevant or not from a statistical point of view ( $p$ -value < 0.05).

In the density study (apparent as well as fresh-state), expressions were also observed that relate the total percentage of substituted aggregate (%) with the density (D) studied in each case. In both cases, the model proposed for the optimal adjustment was obtained using linear regression (Equation (2)), in both cases obtaining very good correlation coefficients ( $R^2 > 0.8$ ):

$$D = a\% + b \tag{2}$$

This model returns a density value through an affine function with parameters including the  $y$ -intercept ( $b$ ), which corresponds to the reference value for the mix without recycled aggregate (RC) and the gradient ( $a$ ) that adjusts the line to the data obtained through a least-squares fitting.

## 3. Results

### 3.1. Fresh-State Properties

Figure 6 shows the fresh-state density as a function of the percentage of total substitution of natural aggregate by recycled aggregate, observing that the density decreases as the recycled aggregate content increases, recording losses of less than 5% in all cases. This decrease is mainly due to the lower density of the recycled aggregates, as well as the greater amount of entrained air (see Table 6) in the mixes with a greater amount of recycled aggregate. This trend was observed by other authors [64,65] incorporating recycled

concrete aggregates in all fractions, with decreases of around 3% for total substitution of coarse aggregate.

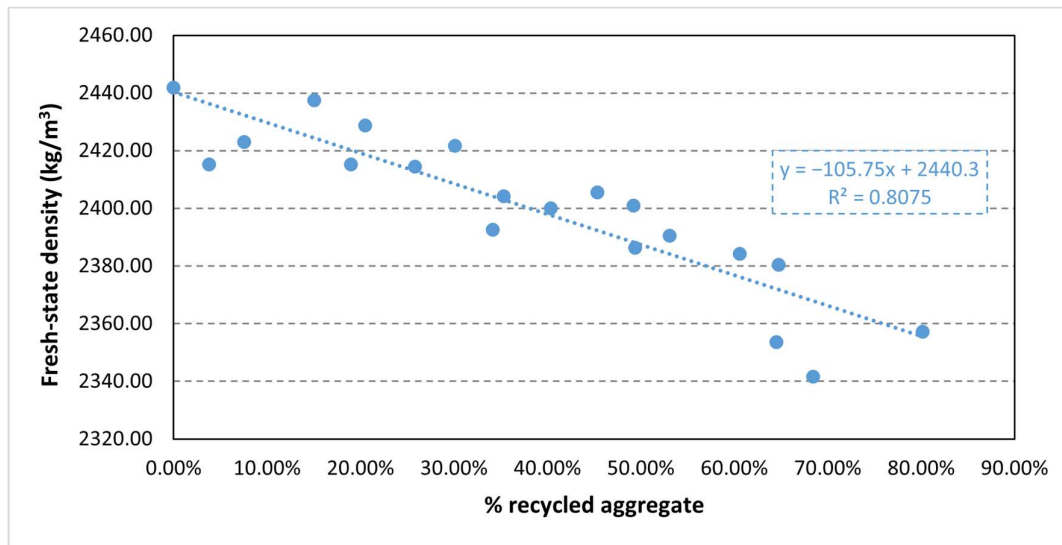


Figure 6. Fresh-state density.

From a statistical point of view, the proposed expression shows a clear linear relationship ( $R^2 > 0.8$ ) between the substitution percentage and the density, enabling the density to be calculated based on the amount of aggregate substituted.

Table 6 shows the slump and entrained air values observed for the different mixes, first showing that all the mixes have a soft consistency (50–90 mm) pursuant to article 33.5 of the CodE, which corresponds to a type S2 settlement according to EN 206. These results confirm that all samples have the same workability regardless of the amount of aggregate substituted, because the amount of super-plasticiser additive as well as the effective water/cement ratio are maintained.

Table 6. Settlement and entrained air.

Mix	Slump (mm)	Entrained Air (Vol. %)
HP	82.8	1.63
HR-0+10	65.0	1.58
HR-0+20	75.0	1.60
HR-0+50	80.0	1.68
HR-25	78.0	1.66
HR-25+10	77.5	1.78
HR-25+20	77.1	1.74
HR-25+50	87.0	1.80
HR-50	89.0	1.66
HR-50+10	82.0	1.66
HR-50+20	60.0	1.82
HR-50+50	77.5	1.74
HR-75	66.3	1.73
HR-75+10	90.0	1.60
HR-75+20	75.0	1.73
HR-75+50	92.5	1.68
HR-100	72.0	1.82
HR-100F10	90.0	1.90
HR-100F20	90.0	1.90
HR-100F50	80.0	1.90

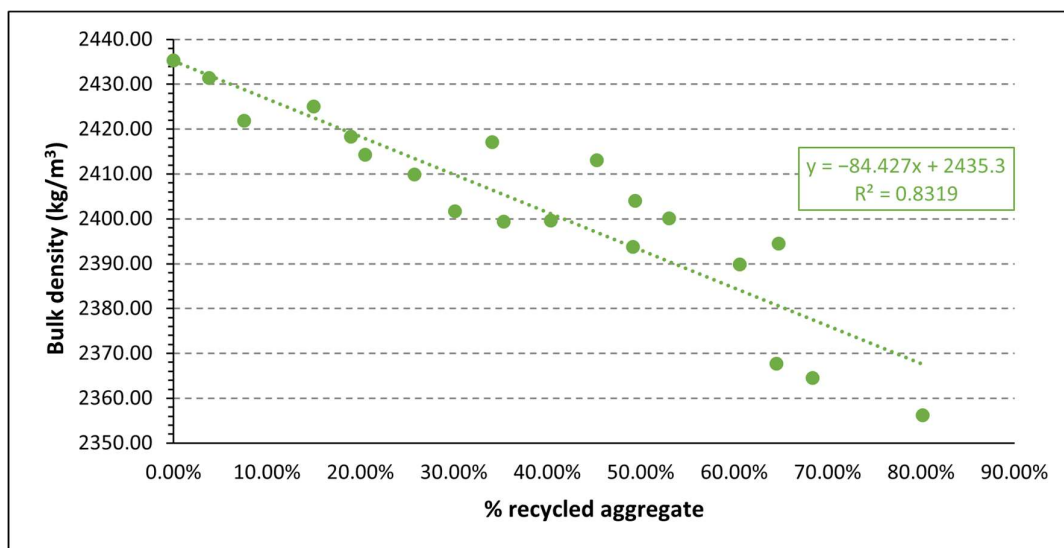
Finally, the entrained air content varies slightly for the different mixes, obtaining values between 1.58% and 1.90%. In this case, the lower density and greater porosity of the recycled aggregates result in a slight increase in air content [66]. Simsek [65] observed a similar behaviour, with slight variations but an increasing trend as the substitution percentage increases, for the coarse fraction as well as for the fine fraction.

### 3.2. Hardened-State Properties

#### 3.2.1. Bulk Density

Figure 7 shows the bulk density data as a function of the amount of recycled aggregate of the different mixes, as well as the adjustment made and the proposed mathematical expression. In this case, the proposed expression also shows the linear relationship ( $R^2 > 0.8$ ) between the density and the percentage of recycled aggregate.

The density behaviour is very similar to that previously described for the fresh-state density, although with slightly lower values. The range of density loss (0.16–3.25%) is lower than that obtained in the fresh state, although the data trend is very similar. Tuyan [67] maintains that this decrease in apparent density is directly related to the presence of macropores in the mortar adhered to recycled concrete aggregates, with a direct relationship between the amount of aggregate substituted and the decrease in density.



**Figure 7.** Apparent density.

#### 3.2.2. Compressive Strength

Figure 8 shows the results of compressive strength at age 7, 28 and 90 days in a  $150 \times 150 \times 150$  mm cubic sample, observing that all the mixes exceed the corresponding design strength with a C30/37 concrete ( $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ ), which indicates that all mixes, regardless of the content and recycled fraction used, could be used from a point of view of this property in manufacturing structural concrete.

In the case of mixes that include only the coarse fraction of the aggregate, there are small strength losses, which increase slightly as the age increases. At 7 days, the HR-25 mix even presents a higher strength than the reference mix (+2.22%). However, strength decreases in the rest of the mixes between 1.42% and 2.5%. At 28 and 90 days, the losses are very similar in all mixes, with decreases between 5.20% and 7.04% at 28 days and between 2.39% and 8.45% at 90 days. This behaviour is similar to that found by Chang [68], who observed a 7-day strength increase of 1.35% for a 25% substitution of coarse concrete aggregate. At 28 days, losses of 3.86% and 7% were observed for substitution percentages of 25% and 75%, respectively. Pedro [69] observed losses of between 3.2% and 7.6% for

concrete with a target  $f_{ck}$  of 45 MPa, substituting 25% to 100% of the coarse fraction with recycled concrete aggregates.

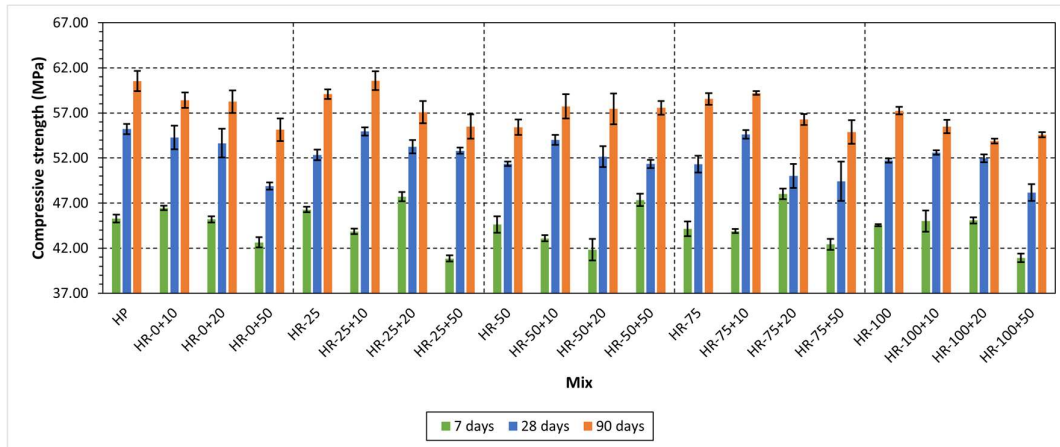


Figure 8. Simple compressive strength.

Regarding the fine fraction, the strength loss is similar to that resulting from substituting the coarse fraction for percentages up to 20%. At 7 days, the behaviour is very similar to that described above, even recording a slight increase (2.61%) for the HR-0+10 mix. At 28 and 90 days, the losses range between 1.67% and 5.83%. In the case of the HR-0+50 mix, the strength losses are significantly higher, with losses between 5.83% and 11.46%. This behaviour agrees with the results observed by other authors. Mohammed [70] recorded a decrease in strength of approximately 14% for a 50% substitution of the fine fraction with concrete aggregate, associating these losses with the significant increase in the absorption of the recycled aggregate. For lower substitution percentages, the results observed by Zega [71] are very similar to those found in this work, with losses around 2% substituting 20% of the fine fraction with concrete sand. At 90 days, the difference with respect to the reference concrete is reduced to approximately 1.6%. In this case, a reduction in the effective water/cement ratio leads to an improvement in the interface (ITZ), which results in behaviour very similar to the reference concrete, even improving other durable properties.

Finally, the simultaneous addition of both fractions mitigates the effect of strength loss, obtaining concretes with strength very similar to the previous ones but with a higher recycled aggregate content. The effect of simultaneous addition can be observed with the data from the statistical analysis, whose parameters are shown in Table 7.

Table 7. Estimation of the parameters of the different models.

Parameter	Compressive			Flexural	Water under Pressure
	7 Days	28 Days	90 Days		
$\mu_{11}$	45.27	55.20	60.53	7.12	4.45
$\alpha_2$	1.00	-2.87	NS	NS	NS
$\alpha_3$	NS	-3.84	-5.12	-0.42	5.98
$\alpha_4$	-1.13	-3.89	-1.97	-0.49	3.38
$\alpha_5$	NS	-3.49	-3.28	-0.66	NS
$\beta_2$	1.18	NS	-2.12	NS	-2.51
$\beta_3$	NS	-1.56	-2.28	NS	NS
$\beta_4$	-2.64	-6.33	-5.39	-0.25	NS
$\alpha\beta_{22}$	-3.60	3.53	3.62	No interaction	3.54
$\alpha\beta_{32}$	-2.72	3.57	4.44		-3.28

$\alpha\beta_{42}$	-1.44	4.24	2.78	NS
$\alpha\beta_{52}$	NS	NS	NS	NS
$\alpha\beta_{32}$	1.51	2.47	NS	NS
$\alpha\beta_{33}$	-2.71	2.36	4.32	NS
$\alpha\beta_{43}$	3.96	NS	NS	NS
$\alpha\beta_{53}$	NS	NS	NS	NS
$\alpha\beta_{23}$	-2.80	6.81	NS	NS
$\alpha\beta_{33}$	5.34	6.30	7.55	-4.83
$\alpha\beta_{43}$	NS	5.64	NS	NS
$\alpha\beta_{53}$	NS	2.79	2.72	NS

Note: NS: not significant.

From a statistical point of view, the effect of adding coarse aggregate is generally negative, as reflected in the data shown in Figure 9. However, the behaviour at 7 days has non-significant factors that reveal that the trend is not as clear as in the other ages. In the case of fine aggregate, the factors follow the same trend, which corroborates the idea that the addition of any fraction of the aggregate results in a decrease in strength.

Additionally, the interaction factors reveal positive values for 28 and 90 days in all cases, which indicates that the strength loss is mitigated when both fractions are added simultaneously, which also contributes to obtaining concretes with similar strength to those that have only one fraction type (coarse or fine), although increasing the percentage of recycled aggregate in the mixes.

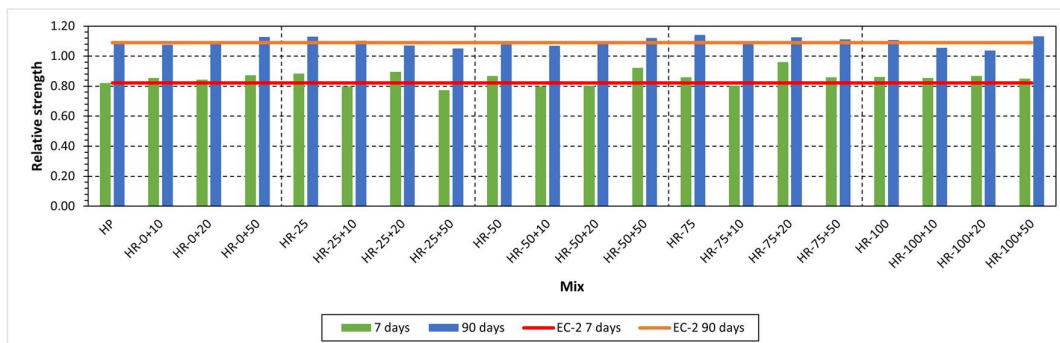


Figure 9. Relative strength.

Regarding the evolution of strength over time, Figure 9 shows the relative strength values of the mixes with respect to the reference value at 28 days, as well as the relative strength estimated in the Eurocode-2 (EC-2) at 7 and 90 days. It shows that all the mixes present a similar evolution in strength gain, in most cases reaching greater strength than expected at 7 and at 90 days. This result shows that the addition of the recycled coarse and/or fine concrete fraction does not influence the cement hydration process. It also indicates that the behaviour recorded at 7 days, in which greater strength is observed than expected by the EC, is concordant with the results of Surendar [72], which evaluated the behaviour of mixes with between 10% and 75% substitution of the coarse fraction with concrete washed aggregate.

Finally, it indicates that all the mixes present the same failure mode regardless of the age studied. This failure mode is classified in the EN 12390-3 standard as satisfactory (Figure 10).



Figure 10. Failure mode in HR-100+50 mix.

### 3.2.3. Flexural Strength

Figure 11 shows the flexural strength at 28 days of the formulated concrete, as well as the estimated strength according to the expression included ( $f_{ct,m,fl} = 1.6 - h/1000$ ) $f_{ct,m}$ ) in point 3.1.8 of the Code. Additionally, the flexural strength has been estimated from the compressive strength, using the expression included in article A19.3.1.8, combined with the expression for average tensile strength and taking 90% of the compressive strength obtained in the cubic samples as  $f_{ck}$ . The resulting expression is shown in the Equation (3)

$$f_{ct,m,fl} = 0.405 \cdot f_{cm}^{2/3} \tag{3}$$

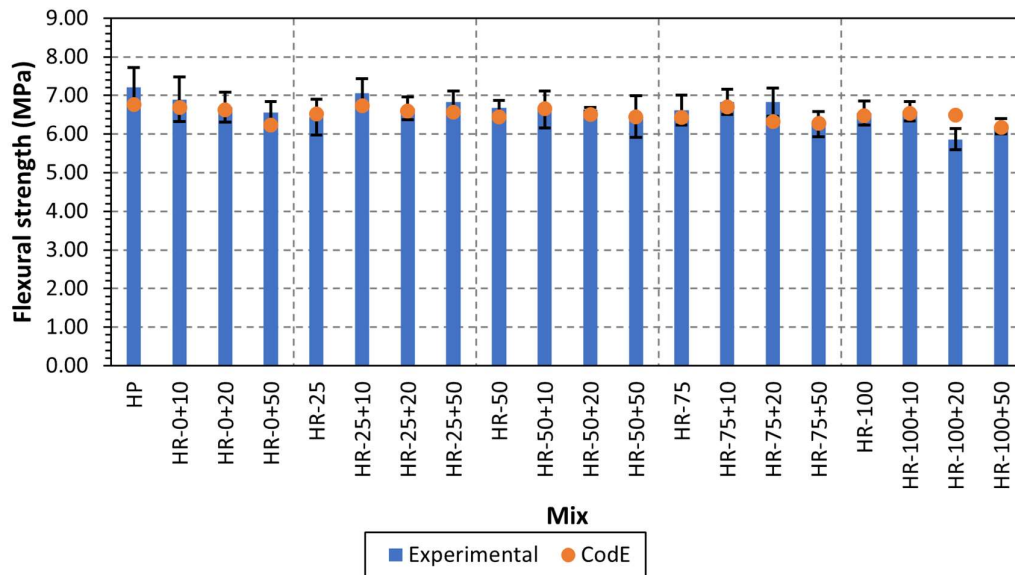


Figure 11. Flexural strength.

In the mixes that only substitute the coarse fraction of the aggregate, lower strengths were observed, with losses of between 7.41% and 10.73%, with very similar values regardless of the substitution percentage. In the case of fine aggregate, the decrease in strength



is greater as the amount of recycled aggregate increases, with losses of between 4.37% and 9.01%. In the mixes that incorporate both fractions, the values are similar except for mixes with 50% fine aggregate, which generally present a higher strength loss, although all values remain below 20%. These values are similar to those recorded by other authors. Saini [73] and Yaba [74] found losses of 4.1% and 10% for 50% and 100% substitution of the coarse fraction, respectively. Regarding the fine fraction, Mohammed [70] observed a loss of 14% by substituting 50% of the fine aggregate with recycled aggregate.

Mohammed [70] and Xiao [75] state that the reduction in strength occurs due to the presence of micro-cracks in the adhered mortar in the recycled fractions, as well as the intrinsic properties (thickness and micro elastic) of the ITZs old mortar/new mortar and old aggregate/old mortar, whose values are worse than those shown by new aggregate/new mortar.

It should also be noted that in all mixes, regardless of their granular skeleton, the failure mechanism consisted of a single large crack that was initiated in the flexural span and with a normal orientation to the tensile stresses generated due to flexure [76].

From a statistical point of view (Table 7), the effect of adding the coarse aggregate is negative, with a non-significant value for the HR-25 mix. Regarding the mixes that incorporate only the fine fraction, there is only one significant factor for the HR-0+50 mix, so there is no clear trend. Likewise, there is no interaction, so the combination of the coarse and fine fractions has no significant effect on the model studied.

#### 3.2.4. Water Penetration under Pressure

Table 8 shows the average and maximum depth of water penetration under pressure, showing that all the mixes, regardless of the percentage and recycled fraction added, have average and maximum depth values below the limits established in the article. 43.3.2 of the Code ( $P_{med} \leq 20$  mm and  $P_{max} \leq 30$  mm) for exposure classes (XS3 and XA3). Therefore, all formulated concretes have a sufficiently impermeable structure against water penetration.

**Table 8.** Average and maximum depths of water penetration under pressure.

Mix	Average Depth (mm)	Maximum Depth (mm)
HP	4.45	14.54
HR-0+50	5.35	9.96
HR-25	5.25	9.09
HR-25+10	6.28	16.06
HR-25+20	5.50	12.58
HR-25+50	5.81	11.43
HR-50	9.51	14.64
HR-50+10	4.64	9.48
HR-50+20	8.27	17.94
HR-50+50	6.49	11.44
HR-75	7.83	15.02
HR-75+10	5.32	10.17
HR-75+20	7.53	14.78
HR-75+50	6.91	12.50
HR-100	6.21	12.97
HR-100+50	6.80	13.87

It firstly indicates that for the mixes that incorporate only the coarse fraction of the recycled aggregate, the average penetration values are higher, presenting high variability in the data obtained, with increases from 17.99% to 113.63%. However, the maximum



penetration values are very similar or even lower in some cases. The fine fraction only has the HR-0+50 mix, which has an average depth 20.15% greater than the reference mix.

In general terms, the variability of the measurements does not allow a clear trend to be established from a statistical point of view, although a slight upward trend can be observed as the recycled aggregate content increases. Analysing the model parameters (Table 7), the substitution of the coarse fraction produces a positive relative effect (increase in the average depth) regardless of the substitution percentage. However, the effect is the opposite for low substitution percentages of the fine fraction (10%). Regarding interferences, there is no clear trend from a statistical point of view, with few significant values.

In general terms, the literature reveals that the depth values increase as the amount of recycled aggregate increases, both coarse and fine [77], although some authors do not consider it significant [78]. Zega [71] observed that the penetration values are slightly higher if the fine fraction of recycled aggregates is used, although the behaviour is very similar for substitution percentages less than 30%. Kapoor [79] recorded depth increases of 30% for total substitution of the coarse fraction with concrete aggregate, as well as increases of 18% when both fractions were combined (100% of the coarse fraction and 50% of the fine). Velardo [80] also observed similar values for average penetration (~8 mm) and somewhat higher values in the case of maximum penetration (~18 mm) using mixed aggregates.

#### 4. Conclusions

The conclusions obtained in this work are presented below:

- Recycled aggregates have greater absorption, as well as lower LA coefficient, density and flakiness index than natural aggregates.
- The coarse recycled fractions (gravel and gravel) and fine (sand) comply with the mechanical, physical and chemical requirements set forth in the current regulations on aggregates for concrete.
- The workability of the concrete is not affected by the addition of the recycled fractions (coarse and/or fine), all of which show a soft consistency.
- The density of the concrete with recycled aggregate is lower than that of the reference concrete in all cases, in the fresh state as well as in the hardened state. The density decreases as the proportion of recycled aggregate in the mix increases, registering density variations of less than 5% in all cases.
- The entrained air content increases slightly as the amount of recycled aggregate increases, although remaining within the usual values for conventional reinforced concrete, not exceeding 1.9% in the mixes with the highest recycled aggregate content.
- The compressive strength of concrete with recycled aggregate is lower than that of the reference mix, with losses of less than 13% in all cases. The greatest losses are recorded in mixes that include a higher percentage (50%) of fine recycled aggregate.
- The flexural behaviour is similar to that recorded in compressive, slightly increasing the maximum loss percentage to 19%. Losses are generally greater in mixes that include a high percentage of recycled aggregate, coarse as well as fine.
- All mixes are therefore suitable for use in class C30/37 structural concrete.
- The expression included in the structural code for estimating the flexural strength is correct, showing values with differences of less than 10% compared to the experimental values for all mixes.
- The penetration depths of water under pressure present great variability, with increases of up to 100%. However, the provisions of the regulations are complied with in all cases.

The conclusions indicate that eco-concretes can be used to manufacture structural concrete analyzing mechanical performance. However, it is necessary to complement the tests carried out by analysing the durability of all mixes, as well as on full-scale structural pieces. Furthermore, in order to properly study the environmental benefit, a Life Cycle

Analysis (LCA) would be necessary to estimate the environmental benefit taking into account the variables concerning waste treatment or transportation.

**Author Contributions:** Conceptualization, P.P., I.F.S.d.B., J.S. and C.M.; methodology, P.P. and I.F.S.d.B.; software, P.P.; validation, P.P.; formal analysis, P.P.; investigation, P.P. and I.F.S.d.B.; writing—original draft preparation, P.P.; writing—review and editing, P.P., I.F.S.d.B., J.S. and C.M.; supervision, I.F.S.d.B., J.S. and C.M.; project administration, J.S. and C.M.; funding acquisition, C.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the Spanish Ministry for Science and Innovation under project PDC2022-133285-C21 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and, by the ‘European Union NextGenerationEU/PRTR’, by Spanish Ministry for Science, Innovation and Universities under project PID2022-136244OB-I00 funded MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and by “FEDER/UE” and the IB 20131 research project financed by the Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura and by the European Union Regional Development Fund (ERDF). Author Pablo Plaza benefitted from Spanish Ministry of Education, Culture and Sport pre-doctoral grant FPU19/06704.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The datasets presented in this article are not readily available because the data are part of an ongoing study. Requests to access the datasets should be directed to cmedi-nam@unex.es.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

### List of Abbreviations

CDW	Construction and demolition waste
RCA	Recycled concrete aggregate
CS-F	Natural sand
CS-M	Natural gravel—medium
CS-C	Natural gravel—coarse
RCF	Recycled sand
RCG	Recycled gravel—medium
RCC	Recycled gravel—coarse

### References

1. Comission, E. Waste Statistics. 2020. Available online: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics) (accessed on 4 May 2024).
2. Ürge-Vorsatz, D.; Novikova, A. Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world’s buildings. *Energy Policy* **2008**, *36*, 642–661. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.10.009>.
3. Peng, C. Calculation of a building’s life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *J. Clean. Prod.* **2016**, *112*, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>.
4. Zhang, Z.; Wang, B. Research on the life-cycle CO<sub>2</sub> emission of China’s construction sector. *Energy Build.* **2016**, *112*, 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.026>.
5. Zhao, M.-Z.; Wang, Y.-Y.; Lehman, D.E.; Geng, Y.; Roeder, C.W. Response and modeling of axially-loaded concrete-filled steel columns with recycled coarse and fine aggregate. *Eng. Struct.* **2021**, *234*, 111733. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111733>.
6. Katerusha, D. Investigation of the optimal price for recycled aggregate concrete—An experimental approach. *J. Clean. Prod.* **2022**, *365*, 132857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132857>.
7. Alfourdin, N.; Pliya, P.; Beaucour, A.L.; Noumowé, A.; di Coste, D. Effect of fine and coarse recycled aggregates on high-temperature behaviour and residual properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *341*, 127847. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127847>.
8. Wang, B.; Yan, L.; Fu, Q.; Kasal, B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *171*, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>.
9. Group, F. *Global Construction Aggregates—Demand and Sales Forecasts, Market Share, Market Size, Market Leaders*; Freedonia Group: Cleveland, OH, USA, 2016.
10. Da, S.; Le Billon, P. Sand mining: Stopping the grind of unregulated supply chains. *Extr. Ind. Soc.* **2022**, *10*, 101070. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101070>.

11. AS 1141.62/HB 155:2002; Guide to the Use of Recycled Concrete and Masonry Materials. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation: Canberra, Australia, 2002.
12. GB/T-25177; Recycled Coarse Aggregate for Concrete. China Academy of Building Research: Beijing, China, 2010.
13. KS-F-2573; Recycled Aggregates for Concrete. Korean Standards and Certification: Seoul, Republic of Korea, 2023.
14. CS-3:2013/HKBD 2009/WBTC-No. 12; Aggregates for Concrete. Civil Engineering and Development Department: Hong Kong, China, 2016.
15. JIS A 5021; Recycled Aggregates for Concrete—Class H. Japanese Industrial Standard: Tokyo, Japan, 2018.
16. JIS A 5022; Recycled Aggregate Concrete—Class M. Japanese Industrial Standard: Tokyo, Japan, 2018.
17. JIS A 5023; Recycled Concrete Using Recycled Aggregate—Class L. Japanese Industrial Standard: Tokyo, Japan, 2022.
18. PTV 406-2003; Recycled Granulates. Aggregates of Concrete Debris, Mixed Debris, Masonry Debris and Asphalt Debris. Impartial Control Body for Construction Products: Brussels, Belgium, 2003.
19. NBN B 15-001; Concrete—Specification, Performance, Production and Conformity—National Supplement to NBN EN 206. Belgian Standards: Brussels, Belgium, 2012.
20. DIN 4226-101; DAFStb; Aggregates for Concrete and Mortar—Part 100: Recycled Aggregates. German Institute for Standardization: Berlin, Germany, 2017.
21. NTC-2008; Technical Standard for Constructions. Ministry of Infrastructures and Transport: Rome, Italy, 2008.
22. DS 2426/DCA No. 34; Concrete—Materials—Rules for Application of EN 206-1. Dansk Standard: Copenhagen, Denmark, 2011.
23. NEN-5905; Aggregates for Concrete. Royal Netherlands Standardization Institute: Delft, The Netherlands, 2005.
24. E 471-2009; Guide for the Use of Coarse Recycled Aggregates in Concrete. National Laboratory of Civil Engineering: Lisbon, Portugal, 2009.
25. MB 2030; Recycling Concrete. Swiss Association of Engineers and Architects: Zürich, Switzerland, 2010.
26. BS 8500-2; Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206. Specification for Constituent Materials and Concrete. British Standards: London, UK, 2019.
27. NF P18-545; Aggregates—Elements of Definition, Conformity and Coding. French Standardization Association: Paris, France, 2021.
28. *Structural Code*; Ministry of Transport Mobility and Urban Agenda: Madrid, Spain, 2021; p. 1789.
29. EN 206:2013+A2:2021/1M:2022; Concrete. Specification, Performance, Production and Conformity. Standardization, E.C.f: Brussels, Belgium, 2022; p. 142.
30. NBR 15116; Recycled Aggregates for Uses in Mortar and Concrete—Requirements and Test Methods. Brazilian Association of Technical Standards: Rio de Janeiro, Brazil, 2021; p. 16.
31. Jayasuriya, A.; Shibata, E.S.; Chen, T.; Adams, M.P. Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregates. *Resour. Conserv. Recycl.* **2021**, *164*, 105121. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105121>.
32. Etxeberria, M.; Vazquez, E.; Mari, A.; Barra, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* **2007**, *37*, 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.
33. McNeil, K.; Kang, T.H.K. Recycled Concrete Aggregates: A Review. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2013**, *7*, 61–69. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>.
34. Tang, Y.; Xiao, J.; Zhang, H.; Duan, Z.; Xia, B. Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *323*, 126546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126546>.
35. Kenai, S.; Debieb, F.; Azzouz, L. Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. In *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction*; Thomas Telford Publishing: London, UK, 2002; pp. 383–392.
36. Zheng, Y.; Zhang, Y.; Zhang, P. Methods for improving the durability of recycled aggregate concrete: A review. *J. Mater. Res. Technol.* **2021**, *15*, 6367–6386.
37. Liang, C.; Cai, Z.; Wu, H.; Xiao, J.; Zhang, Y.; Ma, Z. Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregate concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *282*, 122547.
38. Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L.; Fok, H.; Kou, S.C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Res.* **2004**, *34*, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8).
39. Vinay Kumar, B.M.; Ananthan, H.; Balaji, K.V.A. Experimental studies on utilization of recycled coarse and fine aggregates in high performance concrete mixes. *Alex. Eng. J.* **2018**, *57*, 1749–1759. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.003>.
40. Kou, S.-C.; Poon, C.-S.; Etxeberria, M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cem. Concr. Compos.* **2011**, *33*, 286–291.
41. Singh, R.; Nayak, D.; Pandey, A.; Kumar, R.; Kumar, V. Effects of recycled fine aggregates on properties of concrete containing natural or recycled coarse aggregates: A comparative study. *J. Build. Eng.* **2022**, *45*, 103442.
42. Kaarthik, M.; Maruthachalam, D. A sustainable approach of characteristic strength of concrete using recycled fine aggregate. *Mater. Today Proc.* **2021**, *45*, 6377–6380. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.058>.
43. EN 197-1:2001; Cement, Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2001; p. 40.
44. EN 933-11:2009/AC:2009; Tests for Geometrical Properties of Aggregates. Part 11: Classification Test for the Constituents of Coarse Recycled Aggregate. Ministry of Transport Mobility and Urban Agenda: Madrid, Spain, 2009; p. 18.

45. EN 12620:2003+A1:2009; Aggregates for Concrete. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2009; p. 60.
46. EN 1097-6:2014; Test for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2014; p. 54.
47. EN 933-8:2011+A1:2015/1M:2016; Test for Geometrical Properties of Aggregates. Part 8: Assessment of Fines. Sand Equivalent Test. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016; p. 26.
48. EN 1097-2:2021; Test for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2021; p. 50.
49. EN 933-3:2012; Test for Geometrical Properties of Aggregates. Part 3: Determination of Particle Shape. Flakiness Index. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2012; p. 14.
50. EN 1744-1:2010+A1:2013; Tests for Chemical Properties of Aggregates. Part 1: Chemical Analysis. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2013; p. 64.
51. Andreu, G.; Miren, E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *52*, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>.
52. Gao, D.; Zhu, W.; Fang, D.; Tang, J.; Zhu, H. Shear behavior analysis and capacity prediction for the steel fiber reinforced concrete beam with recycled fine aggregate and recycled coarse aggregate. *Structures* **2022**, *37*, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.075>.
53. Bairagi, N.K.; Ravande, K.; Pareek, V.K. Behavior of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resour. Conserv. Recycl.* **1993**, *9*, 109–126. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(93\)90036-f](https://doi.org/10.1016/0921-3449(93)90036-f).
54. Tran, D.L.; Mouret, M.; Cassagnabère, F.; Phung, Q.T. Effects of intrinsic granular porosity and mineral admixtures on durability and transport properties of recycled aggregate concretes. *Mater. Today Commun.* **2022**, *33*, 104709. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104709>.
55. Teychenné, D.C.; Franklin, R.E.; Erntroy, H.C. *Design of Normal Concrete Mixes*; IHS BRE Press: Watford, UK, 2010.
56. EN 12350-6:2020; Testing Fresh Concrete. Part 6: Density. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2020; p. 15.
57. EN 1350-7:2020+AC:2022; Testing Fresh Concrete. Part 7: Air Content. Pressure Methods. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2022; p. 33.
58. EN 12350-2:2020; Testing Fresh Concrete. Part 2: Slump Test. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2020; p. 13.
59. EN 12390-7:2020/AC:2020; Testing Hardened Concrete. Part 7: Density of Hardened Concrete: European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2020; p. 19.
60. EN 12390-3:2020; Testing Hardened Concrete. Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2020; p. 24.
61. EN 12390-5:2020; Testing Hardened Concrete. Part 5: Flexural Strength of Test Specimens. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2020; p. 14.
62. EN 12390-8:2009/1M:2011; Testing Hardened Concrete. Part 8: Depth of Penetration of Water under Pressure. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2011; p. 16.
63. EN 12390-1; Testing Hardened Concrete. Part 1: Shape, Dimensions and Other Requirements for Specimens and Moulds. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2022; p. 16.
64. Malešev, M.; Radonjanin, V.; Marinković, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* **2010**, *2*, 1204–1225.
65. Şimşek, O.; Pourghadri Sefidehkhani, H.; Gökçe, H.S. Performance of fly ash-blended Portland cement concrete developed by using fine or coarse recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *357*, 129431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129431>.
66. Kurda, R.; de Brito, J.; Silvestre, J.D. Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *157*, 554–572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.128>.
67. Tuyan, M.; Mardani-Aghabaglou, A.; Ramyar, K. Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Mater. Des.* **2014**, *53*, 983–991. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.100>.
68. Chang, Y.-C.; Wang, Y.-Y.; Zhang, H.; Chen, J.; Geng, Y. Different influence of replacement ratio of recycled aggregate on uniaxial stress-strain relationship for recycled concrete with different concrete strengths. *Structures* **2022**, *42*, 284–308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.117>.
69. Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *71*, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030>.
70. Mohammed, S.I.; Najim, K.B. Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. *Structures* **2020**, *23*, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.010>.
71. Zega, C.J.; Di Maio, Á.A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Manag.* **2011**, *31*, 2336–2340. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.011>.
72. Surendar, M.; Beulah Gnana Ananthi, G.; Sharaniya, M.; Deepak, M.S.; Soundarya, T.V. Mechanical properties of concrete with recycled aggregate and M–sand. *Mater. Today Proc.* **2021**, *44*, 1723–1730. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.896>.

73. Saini, B.S.; Singh, S.P. Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *264*, 120233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120233>.
74. Yaba, H.K.; Naji, H.S.; Younis, K.H.; Ibrahim, T.K. Compressive and flexural strengths of recycled aggregate concrete: Effect of different contents of metakaolin. *Mater. Today Proc.* **2021**, *45*, 4719–4723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.164>.
75. Xiao, J.; Tang, Y.; Chen, H.; Zhang, H.; Xia, B. Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete. *J. Clean. Prod.* **2022**, *366*, 132895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132895>.
76. Kumar, R.; Gurram, S.C.B.; Minocha, A.K. Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete. *Mag. Concr. Res.* **2017**, *69*, 1288–1295. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00030>.
77. Thomas, C.; Setien, J.; Polanco, J.A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *114*, 536–546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.203>.
78. Faella, C.; Lima, C.; Martinelli, E.; Pepe, M.; Realfonzo, R. Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study. *Cem. Concr. Compos.* **2016**, *71*, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.009>.
79. Kapoor, K.; Singh, S.P.; Singh, B. Water Permeation Properties of Self Compacting Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates. *Int. J. Civ. Eng.* **2018**, *16*, 47–56. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0062-x>.
80. Velardo, P.; Sáez del Bosque, I.F.; Sánchez de Rojas, M.I.; De Belie, N.; Medina, C. Durability of concrete bearing polymer-treated mixed recycled aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *315*, 125781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125781>.

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.