

UNIVERSITAT
JAUME·I

UNIVERSITAT JAUME I

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIES I CIENCIES EXPERIMENTALS

GRADO DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

***Estudio y análisis del uso de residuos porcelánicos
provenientes de la industria cerámica para la
fabricación de hormigón estructural***

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autor:

Jordi Bellés Moliner

Tutores:

Vicente Alberó Gabarda

Marta Roig Flores

Castellón de la Plana, Septiembre de 2022

Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 6 |
| 1.1. | Objetivos | 6 |
| 1.2. | Antecedentes | 6 |
| 1.3. | Contexto | 8 |
| 2. | Estado del arte. | 10 |
| 2.1. | Generación de residuos de la industria cerámica (contexto, datos, estadísticas)..... | 10 |
| 2.2. | Reciclado de residuos de la industria cerámica (estudios científicos y aplicaciones prácticas)..... | 10 |
| 2.3. | Requisitos y límites para el uso de áridos reciclados en el Código Estructural (2022)12 | |
| 2.3.1. | Código estructural | 13 |
| 2.3.2. | Anejo 10 del Código Estructural - Hormigones de limpieza..... | 14 |
| 2.4. | Hormigón expuesto a altas temperaturas | 15 |
| 3. | Programa experimental y objetivos | 16 |
| 3.1. | Metodología | 18 |
| 3.1.1. | Caracterización de los áridos (granulometría, densidad y absorción) | 18 |
| 3.1.2. | Fabricación y ensayo de hormigones con áridos reciclados | 36 |
| 3.1.3. | Ensayo de asentamiento | 47 |
| 3.1.4. | Ensayo de hormigón endurecido – Resistencia a compresión..... | 50 |
| 3.1.5. | Ensayo de hormigón endurecido – Tracción indirecta..... | 51 |
| 3.2. | Metodología experimental para el estudio de la aplicación como hormigón expuesto a altas temperaturas | 53 |
| 4. | Resultados | 58 |
| 4.1. | Ensayo de asentamiento | 58 |
| 4.1.1. | Resultados del ensayo de asentamiento..... | 58 |
| 4.1.2. | Conclusiones del ensayo de asentamiento | 63 |
| 4.2. | Ensayo de hormigón endurecido – Resistencia a compresión..... | 64 |
| 4.2.1. | Resultados del ensayo de resistencia a compresión | 64 |
| 4.2.2. | Conclusiones del ensayo de resistencia a compresión | 68 |
| 4.3. | Ensayo de hormigón endurecido – Tracción indirecta..... | 69 |
| 4.3.1. | Cálculos del ensayo de tracción indirecta | 69 |
| 4.3.2. | Resultados del ensayo de tracción indirecta..... | 70 |
| 4.3.3. | Conclusiones del ensayo de tracción indirecta | 76 |

| | |
|--|----|
| 5. Aplicación práctica: estudio del comportamiento del hormigón fabricado con árido reciclado expuesto a altas temperaturas..... | 78 |
| 5.1. Resultados..... | 78 |
| 5.2. Conclusiones de los resultados de la aplicación de altas temperaturas..... | 81 |
| 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación..... | 86 |
| 6.1. Conclusiones..... | 86 |
| 6.2. Futuras líneas de investigación..... | 87 |
| 7. Presupuesto..... | 88 |
| 8. Bibliografía..... | 90 |

1. Introducción

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el análisis y estudio de la viabilidad de áridos reciclados porcelánicos provenientes de la industria cerámica para la fabricación de hormigón estructural.

Para conseguir dicho fin se pretenden realizar estudios sobre distintos tipos de hormigón, en los que la proporción de árido reciclado porcelánico variará en función de la agresividad del porcentaje de sustitución de los áridos convencionales. Cabe destacar que los áridos cerámicos no son recogidos como árido según la normativa vigente, por lo que, con estos estudios, se pretende conseguir una conclusión clara sobre la utilización de este tipo de árido reciclado que, de ser positivos, lograrían aumentar el porcentaje de árido reciclado marcado por la normativa actual, además de valorar la validez y funcionalidad del árido cerámico en la fabricación de hormigón estructural.

Además, utilizando este tipo de árido para la fabricación de hormigón estructural se pretende aportar una salida a los residuos cerámicos que tanto abundan, en este caso, en la provincia de Castellón y limitar la explotación de canteras y graveras, donde se obtiene actualmente los áridos usados en la fabricación del hormigón.

1.2. Antecedentes

El hormigón ha sido un material muy usado a lo largo de la historia para la construcción y demás aplicaciones estructurales. Su fabricación se basa en la mezcla de cemento, agua y áridos finos y gruesos.

Históricamente, los áridos han sido obtenidos, y los son actualmente, a partir yacimientos detríticos no consolidados o mediante la trituración de rocas y sedimentos consolidados extraídos de explotaciones denominadas canteras (Figura 1). Esta obtención de áridos naturales implica una explotación de recursos vírgenes en la naturaleza y esto, a su vez, implica un empobrecimiento continuo de las canteras y graveras españolas de forma irreversible (*Luaces, 2010*).



Figura 1. Áridos finos y gruesos convencionales. Asociación Galega de Áridos (Arigal).

Es aquí donde entra la utilización de árido reciclado como sustitutivo de los áridos convencionales previamente mencionados. La primera investigación sobre áridos reciclados para la fabricación de hormigón data de 1946 y fue realizada por Glushge, en Rusia. A partir de aquí, fueron muchas las investigaciones que se llevaron a cabo con el fin de utilizar árido reciclado para fabricar hormigón. Los temas más comunes sobre los que trataban estos trabajos eran: caracterización de áridos, confección y análisis de mezclas de áridos y análisis y ensayos sobre hormigón fabricado con áridos reciclados para conocer su durabilidad y sus prestaciones físicas y mecánicas.

En España existen apartados del Código Estructural que hablan sobre la utilización de estos áridos reciclados, qué materiales pueden catalogarse como tal, qué porcentaje de utilización está permitido y la composición del hormigón reciclado, tanto en hormigón estructural como en hormigón de limpieza.

Cabe destacar, que la gran mayoría de estudios que existen sobre los áridos reciclados corresponden a residuos de construcción y demolición. En cuanto a los residuos cerámicos existen muchos menos estudios y es por eso por lo que existe la necesidad de investigar y conocer cuáles son las prestaciones y características de este tipo de hormigón reciclado con árido cerámico, en este caso, porcelánico.

Por otra parte, en Castellón existe una gran cantidad de residuos provenientes de la industria cerámica. Estos son en parte reutilizados por las propias empresas generadoras de residuos, etiquetados y almacenados para su posterior gestión y, en el caso que recoge este trabajo, reciclados para la generación de nuevos elementos, como pueden ser arenas y áridos, para posteriormente emplear en nuevas construcciones.

Según el artículo (Vicente, 2018) en el que se habla sobre los residuos y la cogeneración en la industria cerámica, concretamente en el Grupo Pamesa, su presidente afirma que el sector cerámico tiene entre un 1,5 y 2% de roturas en el proceso de producción y que ellos, el Grupo

Pamesa, tritura y reaprovecha el 20% de las roturas de todo el sector, llegando a recuperar en el año 2017 300 millones de kilos en roturas.

Aun así, las aplicaciones de estos residuos cerámicos son escasas y su salida más habitual es el vertedero. Es aquí donde surge una perfecta aplicación para los residuos cerámicos como sustitutos de los áridos convencionales en el hormigón estructural (Figura 2). Estos residuos deben ser tratados y acondicionados para poder ser utilizados en la fabricación del hormigón respecto a su tamaño y demás propiedades físicas. Pero su utilización como árido solucionaría o reduciría los daños de la explotación irreversible de canteras y graveras y favorecería en gran medida la gestión de los residuos cerámicos.



Figura 2. Residuos cerámicos convertidos en áridos finos y gruesos para su aplicación en hormigón estructural.

1.3. Contexto

Según la UEPG (Unión Europea de Productores de Áridos) en su visión anual de 2020 (UEPG, 2020), la producción de áridos alcanza la cifra de 3 billones de toneladas anuales para cubrir la demanda media del ciudadano europeo de 6 toneladas per cápita y por año.

De entre todo este árido producido, reciclado o extraído de graveras y canteras se encuentran las materias primas siguientes: arena, grava, roca triturada, árido reciclado, árido manufacturado y árido marino. La mayor parte de estas materias primas son utilizadas para la fabricación de hormigón, ya sea de forma directa para verter en la misma obra de construcción, hormigón prefabricado y piezas arquitectónicas de hormigón, o de forma indirecta mediante el acondicionamiento de estas materias para elaborar materiales estructurales sin consolidar y que posteriormente podrían ser utilizados para fabricar hormigón.

La extracción de áridos supone un gran impacto medioambiental en las zonas de alrededor de las canteras y graveras. En España, concretamente, existen 1848 canteras y pozos controlados

por 1056 empresas diferentes. Las extracciones más importantes del sector español son de arena y grava con 44,6 millones de toneladas al año, y de roca triturada con 96,8 millones de toneladas al año. Además, la cantidad de árido reciclado utilizado en el territorio español es de 3,5 millones de toneladas al año.

Estas materias primas extraídas y recicladas son utilizadas en su gran mayoría para la fabricación de hormigón y, tal y como se observa, el árido reciclado supone un porcentaje muy inferior al resto de materias primas convencionales con las que se ha estado fabricando hormigón. Esto se debe en parte a la falta de conocimiento y estudios que existen sobre los tipos de árido reciclado y las propiedades que estos pueden aportar al hormigón. Esto se ve reflejado en el Código Estructural, vigente desde finales de 2021, y en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), publicada en el año 2008, donde se indica el uso de la fracción gruesa del árido reciclado de hormigón estructural hasta un límite máximo de 20% de sustitución del árido grueso convencional.

Es tal la necesidad de reducir las explotaciones de canteras y graveras, ya que existe el riesgo de erosión de las costas de ríos y océanos y de destrucción de espacios naturales, que la Agencia Internacional de la Energía recomienda la utilización de materiales sustitutivos como reemplazo de los áridos naturales del hormigón.

Son muchos los candidatos para lograr la sustitución de áridos en la fabricación del hormigón estructural. En este caso, los residuos cerámicos en la provincia de Castellón son una excelente opción ya que su generación se produce de forma masiva, tal y como se ha descrito antes en el artículo (Vicente, 2018) entre 1,5 y 2% de roturas de todo lo que se produce. Esta masificación de residuos se debe a la gran industria cerámica existente en el territorio. Así pues, constituye una aplicación sostenible y responsable con el medioambiente que reduciría en gran cantidad los residuos generados por las empresas y que, además, contribuiría a la reducción de explotaciones de canteras y graveras en el territorio español.

2. Estado del arte.

2.1. Generación de residuos de la industria cerámica (contexto, datos, estadísticas)

Los avances tecnológicos y el continuo desarrollo de la industria han implicado en todos los sectores de la industria una mayor perfección en los procesos productivos y, por lo tanto, en los productos fabricados para posteriormente comercializarlos. No obstante, a pesar de estos grandes avances, siempre existirá un porcentaje de material que no se convierta en un producto para ser comercializado. Este porcentaje corresponde a los subproductos y residuos y su origen recae en las distintas fases del ciclo de vida del producto: en la recepción y obtención de las materias primas, en la fase del proceso productivo y en la distribución de los productos.

En el caso de este proyecto, el proceso de fabricación de elementos cerámicos es variado según el producto que se quiere obtener, pero un proceso que resume globalmente todos los procesos de fabricación de cerámicas consta de recepción de tierras, prensado, secado, esmaltado, cocción y procesos de manutención y almacenamiento del producto.

La totalidad de residuos que se producen en estos procesos se encuentran repartidos en la fase de cocción del material y en los procesos posteriores, debido a su manutención y gestión, lo cual conlleva un riesgo intrínseco de poder dañar o romper los elementos fabricados. Es decir, que la mayoría de residuos provenientes de la industria cerámica provienen de roturas, defectos dimensionales o defectos de cocción (*Ibáñez-Forés, Gómez-Parra, Bovea, Gallardo, & Colomer*). Esta cantidad de residuo depende en gran medida del tipo de planta, de los requerimientos del producto y de otras consideraciones técnicas.

Debido a la gran cantidad de plantas cerámicas que existen concentradas en la zona de Castellón la gestión de los residuos cerámicos generados supone un reto medioambiental. Es tal la concentración que Castellón supone el 90% de la actividad cerámica española y, en consecuencia, los residuos que generan dichas empresas son un problema por tratar.

Esta situación pues, supone un problema medioambiental a largo plazo por el peligro que supone el acopio de tanto material cerámico en los vertederos. En este caso, utilizando residuo cerámico, más concretamente residuo cerámico porcelánico, se pretende estudiar su viabilidad como sustitutivo de áridos convencionales del hormigón en diferentes porcentajes y poder así reducir la cantidad de residuos llevados a vertederos, contribuyendo en la sostenibilidad medioambiental.

2.2. Reciclado de residuos de la industria cerámica (estudios científicos y aplicaciones prácticas)

La industria cerámica genera residuos de forma inevitable y, aunque exista la ayuda de las mejoras y avances que se introducen en el proceso productivo, es imposible reducir al 0% los

residuos generados. Como consecuencia, el tratamiento de estos residuos es fundamental para garantizar una reducción del impacto ambiental de esta industria.

El residuo proveniente de la industria cerámica es clasificado según la Lista Europea de Residuos (LER) como inertes y no peligrosos (*La industria cerámica apuesta por la economía circular para garantizar la sostenibilidad de la edificación, 2022*). Esta denominación implica que el residuo puede ser utilizado en una gran cantidad de aplicaciones por su alta capacidad de reciclabilidad. Algunas de estas aplicaciones son como material de relleno en obras, estabilización de carreteras como material previo al prensado y reasfaltado de las vías, áridos para morteros y hormigón, tierra batida en pistas de tenis, substrato en el sector de la jardinería y agricultura, o incluso como elemento de cubrición en la agricultura para evitar temperaturas excesivas en el terreno y, en consecuencia, se evapore el agua presente en la tierra.

Además, al tratarse de un material inerte, este no altera la composición del agua ni incluye sustancias perjudiciales para ningún ser vivo, por lo que el aprovechamiento del agua de la lluvia mediante sistemas de drenaje fabricados con estos materiales es apto para poder utilizarla posteriormente o simplemente almacenarla.

Uno de los usos más útiles y valorizados es como sustitutivo de áridos convencionales en la fabricación de hormigón estructural. En los últimos años se han publicado varios estudios que muestran resultados prometedores.

El estudio (*Pacheco-Torgal & Jalali, 2009*) ha investigado la utilización de áridos cerámicos reciclados provenientes de residuos de la industria cerámica para la fabricación de hormigón, tales como gres blanco con doble cocción y ladrillos cerámicos. Los resultados de este estudio han determinado que el hormigón con residuos cerámicos, aunque tiene pérdida de resistencia, posee una mayor durabilidad debido a las propiedades puzolánicas que le otorga el árido reciclado. También se observa como la sustitución de arena convencional por arena cerámica es una buena opción ya que no existe pérdida de resistencia y posee una mayor durabilidad. En cuanto a la sustitución de áridos gruesos, los resultados de resistencia son prometedores, pero los resultados en cuanto a absorción de agua y permeabilidad al agua son inferiores a lo que se esperaba. Es por eso que se concluye que la sustitución de áridos finos es mucho más efectiva.

Otro estudio, en este caso (*Medina Martínez, Sánchez de Rojas, & Frías Rojas, 2012*) en el que se estudia la reutilización de residuos cerámicos de sanitarios como árido grueso reciclado sustituyendo de forma parcial (20% y 25%) el árido grueso natural en la fabricación de hormigones con fines estructurales, se ha determinado que los hormigones reciclados ecoeficientes presentan un comportamiento mecánico y durable superior a la de los hormigones convencionales y que el árido reciclado cerámico no disminuye la consistencia de los hormigones reciclados. Además, se ha concluido que la resistencia a compresión y tracción indirecta aumenta a medida que el porcentaje de sustitución de árido convencional por árido reciclado cerámico también aumenta. En consecuencia, se concluye que los hormigones reciclados ecoeficientes obtenidos por la sustitución parcial del árido grueso convencional por árido grueso cerámico pueden ser utilizados para la fabricación de hormigones estructurales.

Otro estudio que también trata este uso de los desechos cerámicos como agregado de hormigón es el (*Ray, Haque, Sakib, & Ferdous Mita, 2021*). Concluye que, para casi todos los tipos de áridos

cerámicos, generalmente el hormigón con áridos cerámicos tiene valores de asentamiento bajos debido a su gran porosidad, alta absorción de agua, tamaño angular y superficie rugosa de los áridos cerámicos. Por lo tanto, en función del agua absorbida por los áridos cerámicos, la relación agua-cemento debe ajustarse cuidadosamente para lograr el valor de asentamiento deseado. La forma regular y la superficie rugosa de estos áridos cerámicos brindan un área de superficie específica superior para adherirse fuertemente a la pasta de cemento. Además, la alta porosidad y absorción de agua de los áridos cerámicos proporciona el alcance del curado interno y la hidratación adicional del cemento. Junto con estos factores contribuyentes, las propiedades puzolánicas y la estructura homogénea de los áridos cerámicos también dan como resultado un aumento en la resistencia a la compresión. Por otro lado, la resistencia a la compresión del hormigón CA se crea, especialmente utilizando ladrillos y residuos de aisladores como agregado grueso, debido a la mala unión de la pasta de cemento con el agregado, ya que estos áridos generalmente tienen una densidad de partículas más baja, una mayor absorción de agua y una estructura más rugosa y textura de superficie suave. En caso de reemplazo de agregado fino, las tejas y la loza mostraron mejores resultados, mientras que los áridos de cerámica sanitaria y ladrillo muestran una tendencia a la baja en la resistencia a la compresión del hormigón.

Y, por último, un estudio que investiga sobre los desechos cerámicos, compuestos por baldosas cerámicas, polvo cerámico, cerámica sanitaria y residuos cerámicos de aisladores eléctricos, para fabricar hormigón sostenible es (Vilas Meena, Kumar Jain, Sing Chouhan, & Singh Beniwal, 2022). Esta investigación concluye que la introducción de áridos cerámicos aumenta la resistencia del hormigón y que este aumento es mayor cuando el contenido de residuos cerámicos aumenta. También se detecta que la absorción de agua del hormigón es superior con la presencia de áridos finos y gruesos cerámicos. Y, por último, que la durabilidad del hormigón es mucho mayor debido a que presenta más resistencia a la penetración de partículas y que la resistencia a la abrasión se ve aumentada conforme el contenido de áridos cerámicos aumenta, debido a las características puzolánicas que otorga al hormigón este tipo de árido.

Así pues, los áridos reciclados cerámicos sobre los que se han realizado estudios son, generalmente, los más comunes en la industria como puede ser el ladrillo cerámico o la cerámica sanitaria. En este caso, el proyecto pretende estudiar el residuo porcelánico, sobre el cual existen muy pocas investigaciones y que, gracias a este estudio, se plantea como una posible opción a la hora de utilizarlo como árido reciclado de la industria cerámica.

2.3. Requisitos y límites para el uso de áridos reciclados en el Código Estructural (2022)

El Código Estructural trata el uso de áridos reciclados desde dos aplicaciones posibles, en el hormigón estructural y en el hormigón de limpieza.

2.3.1. Código estructural

El Código Estructural, aprobado según el Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, trata en uno de sus artículos sobre los áridos reciclados.

El Código define el árido reciclado como aquél producto resultante de procesos de reciclado de hormigón y solo permite su utilización como sustitutivo de árido grueso en la fabricación de hormigón. Se considera que los áridos gruesos reciclados obtenidos a partir de hormigones estructurales sanos, o bien de hormigones de resistencia elevada, son adecuados para la fabricación de hormigón reciclado estructural. También define las propiedades adicionales que deben tener los áridos reciclados, manteniéndose vigentes las características expuestas en otros apartados del Código sobre los áridos gruesos convencionales.

Es de crucial importancia el porcentaje máximo de sustitución de árido convencional por árido reciclado permitido por este documento. Dicho porcentaje es del 20% de sustitución de árido grueso y, en caso de superar dicho valor, se deberá realizar un proceso de investigación y experimentación, que deberá ser aprobado por la Dirección facultativa.

Además, no se permite el uso de este árido grueso reciclado en hormigón en masa o armado de más de 40 MPa, así como su uso en hormigón pretensado.

También cabe destacar que quedan fuera de este Código todos aquellos hormigones que a continuación se exponen:

- Hormigones fabricados con árido fino reciclado.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón (áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.).
- Hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de estructuras de hormigón con patologías que afectan a la calidad del hormigón tales como álcali-árido, ataque por sulfatos, fuego, etc.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigones especiales tales como aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

2.3.1.1. Requisitos de los áridos reciclados según el Código Estructural

La forma de denominar este tipo de hormigón es con la letra «R» para así indicar su naturaleza.

En cuanto a propiedades físicas y mecánicas, el árido grueso reciclado deberá presentar una absorción no superior al 7 % y el árido grueso natural, con el que vaya a ser mezclado, no superior al 4,5 %. Para la resistencia al desgaste del árido grueso reciclado el valor del coeficiente de Los Ángeles no será superior al 40 %.

Respecto a la composición del árido grueso reciclado, este debe tener las siguientes proporciones de material, mostradas en la *Tabla X*.

Tabla 1. Requisitos de composición del árido grueso reciclado.

| Materiales | Límite |
|--|--------|
| Hormigón, mortero, material pétreo | ≥ 95% |
| Partículas ligeras | ≤ 2% |
| Materiales bituminosos | ≤ 1% |
| Otros materiales (arcilla, vidrio, plásticos, metales, etc.) | ≤ 0,5% |

2.3.1.2. Retos del estudio frente al Código Estructural

Tal y como dice el Código Estructural, el árido proveniente de la industria cerámica no está recogido como árido reciclado permitido. Este estudio es una forma de investigar su utilidad y funcionalidad como árido grueso y fino, algo que tampoco se recoge, en hormigón estructural y utilizando porcentajes de sustitución superiores al 20% marcado por dicho Código. Los resultados serán los que aclaren si este residuo cerámico es un buen candidato como árido reciclado, si además de áridos gruesos también se pueden reciclar áridos finos y si el porcentaje de sustitución puede incrementarse.

2.3.2. Anejo 10 del Código Estructural - Hormigones de limpieza

En el Anejo 10 del Código Estructural se trata el hormigón de limpieza y todas sus especificaciones reglamentarias. El hormigón de limpieza es un hormigón que tiene como fin evitar la desecación del hormigón estructural durante su vertido, así como una posible contaminación de este durante las primeras horas de su hormigonado.

2.3.2.1. Requisitos de los áridos según el Anejo 10 del Código Estructural

Los áridos utilizados en este tipo de hormigón pueden ser de procedencias muy dispares:

- Áridos, tanto finos como gruesos, procedentes de rocas machacadas o escorias siderúrgicas apropiadas, así como arenas y gravas rodadas.
- Áridos gruesos reciclados en una proporción del 100%, siempre que se cumplan las especificaciones definidas en el artículo de áridos reciclados del Código Estructural. Cabe destacar que, a pesar de la permisividad de este tipo de hormigón respecto a los áridos reciclados, el árido reciclado cerámico no está permitido.
- Áridos procedentes de escorias granuladas que, a su vez, provienen de la combustión en centrales térmicas, en caso de que haya evidencia de sus buenas características y funcionalidad y siempre que cumplan las especificaciones del artículo de áridos siderúrgicos del Código Estructural.

2.3.2.2. Retos del estudio frente el Anejo 10 del Código Estructural

En este caso y a diferencia del apartado anterior, en este estudio no se pretende estudiar la funcionalidad del árido reciclado proveniente de la industria cerámica en hormigón de limpieza. El estudio se enfoca en la funcionalidad de este tipo de árido en el hormigón estructural, pero los resultados que se obtengan también serán potencialmente aplicables para los hormigones de limpieza, ya que tienen restricciones más permisivas.

2.4. Hormigón expuesto a altas temperaturas

Los incendios que se producen en viviendas, fábricas y demás construcciones fabricadas con hormigón, exponen a dicho material a altas temperaturas durante un periodo de tiempo limitado. El fuego es una de las acciones más destructivas a las que se pueden exponer materiales que contienen cemento. A lo largo de la historia, son innumerables los accidentes que se han producido por el debilitamiento de las estructuras de hormigón tras haber sido expuestas a este fenómeno.

El hormigón tiene muy buenas características en respuesta a incendios. No tiene carga de fuego, es decir, no es combustible, por lo que la propagación del incendio por medio de este material es nula. Al estar en contacto con una fuente incendiada, no desprende humos ni gases tóxicos que pudieran afectar a los ocupantes del edificio o local. Además, la reparación de la estructura dañada es relativamente sencilla tras un incendio si este no ha debilitado fuertemente la estructura del elemento afectado. No obstante, el choque térmico debido al agua utilizada para apagar incendios puede afectar negativamente a las prestaciones del hormigón.

Los efectos sobre el hormigón provocado por la exposición prolongada a temperaturas elevadas se ven reflejados sobre la composición química, la estructura física y el contenido de humedad de la pasta de cemento. Los efectos principales por los que el hormigón se ve afectado son la deshidratación de la pasta de cemento endurecida y el *spalling* (fractura del hormigón en capas paralelas a la superficie calentada). La deshidratación provoca a su vez, una disminución de la rigidez elástica y de la resistencia mecánica del hormigón. Según el artículo (Xargay, Ripani, Sambarato, & Folino, 2016) estos efectos tienen una relación directa con la temperatura a la que es expuesto el hormigón. Por debajo de los 200°C el único proceso existente es la expulsión del vapor de agua que habita en los poros del hormigón, sin causar grandes cambios en las propiedades físicas y mecánicas del material. A partir de los 200°C aparecen poros de mayor tamaño y su distribución se hace más uniforme, provocado por la deshidratación de los silicatos de calcio hidratados. A partir de los 500°C se descompone químicamente el hidróxido de calcio, responsable de la resistencia mecánica del hormigón y se degradan los áridos gruesos, provocando una pérdida global e irreversible de propiedades físicas y químicas.

En cuanto al *spalling*, es un fenómeno que se explica por las tensiones inducidas por las altas temperaturas sobre los poros del hormigón que, al no poder expandirse, tiende a fisurarse. Alrededor de los 250°C la presión en los poros encuentra su valor máximo y a temperaturas inmediatamente superiores el hormigón se fisura liberando la presión y las tensiones inducidas.

3. Programa experimental y objetivos

El proceso experimental que se ha seguido durante la realización del estudio consta de una fase de caracterización del árido reciclado (Figura 4) y del árido calizo (Figura 3), que consta de ensayos de granulometría, de densidad y de absorción de agua. Posteriormente, se ha procedido con la fabricación del hormigón en distintas proporciones para realizar los ensayos pertinentes y conocer así su comportamiento. Y, por último, se han utilizado algunos de los hormigones fabricados para conocer su comportamiento a altas temperaturas, ya que se espera un comportamiento distinto al hormigón convencional al contener material cerámico que ha sido estabilizado térmicamente a lo largo de su ciclo de vida. Este programa experimental se observa mejor en la Figura 5.

El árido reciclado utilizado para realizar este estudio es un material cerámico porcelánico que, según su grado de triturado, se ha utilizado como árido fino (0,063 - 4 mm) o grueso (4 – 10 mm) y que, mezclado con grava y arena convencionales, han resultado en distintos tipos de hormigón estructural.



Figura 3. Izquierda: árido fino convencional. Derecha: árido grueso convencional.



Figura 4. Izquierda: árido fino porcelánico. Derecha: árido grueso porcelánico.

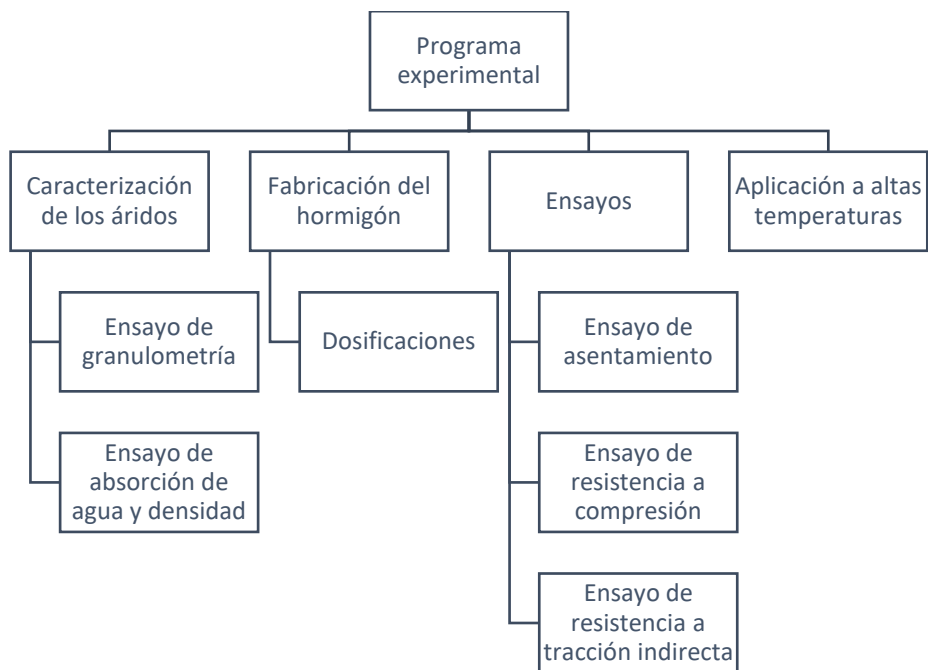


Figura 5. Esquema del programa experimental.

3.1. Metodología

3.1.1. Caracterización de los áridos (granulometría, densidad y absorción)

La caracterización de los áridos se ha realizado mediante dos estudios que determinan las características más importantes del árido respecto a su interacción con el resto de elementos que forman el hormigón.

3.1.1.1. *Granulometría*

El ensayo para determinar la granulometría de las partículas que componen los áridos estudiados se ha realizado siguiendo la normativa UNE EN 933-1. Este ensayo consiste en dividir y separar mediante una serie de tamices un material en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. En este caso, el material a tamizar ha sido el árido porcelánico y el árido convencional, concretamente un árido calizo.

3.1.1.2. *Procedimiento*

El ensayo empieza por recoger una muestra significativa del material y debe ser reducida en cantidad aplicando la Norma EN 932-2 de cuarteo (Figura 7). El procedimiento de reducción de material se repite tantas veces como sea necesario hasta conseguir la masa de material acorde a la Norma EN 933-1. Una vez obtenida esta masa, se procede a secarla en un horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante.

Una vez enfriada, se pesa para obtener la masa inicial y se procede al lavado del material por el tamiz de 0,063 mm. Posteriormente se seca en el horno a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante (Figura 6).

Se deja enfriar de nuevo y se pesa para obtener la masa seca lavada. A partir de aquí el material está listo para ser tamizado. En este caso, el tamizado se realiza mediante agitación manual empezando por el tamiz de 10 mm en árido grueso y 4 mm en árido fino, llegando en ambos tipos de árido hasta el tamiz de 0,063 mm. Para conocer la masa que retiene cada tamiz se pesa individualmente la porción de material que ha retenido cada tamiz y se registra su valor, obteniendo así la distribución del material en cuanto a granulometría (Figura 8).



Figura 6. Secado de la muestra de áridos calizos (arena en la bandeja superior y grava en la inferior) previo al ensayo de granulometría.

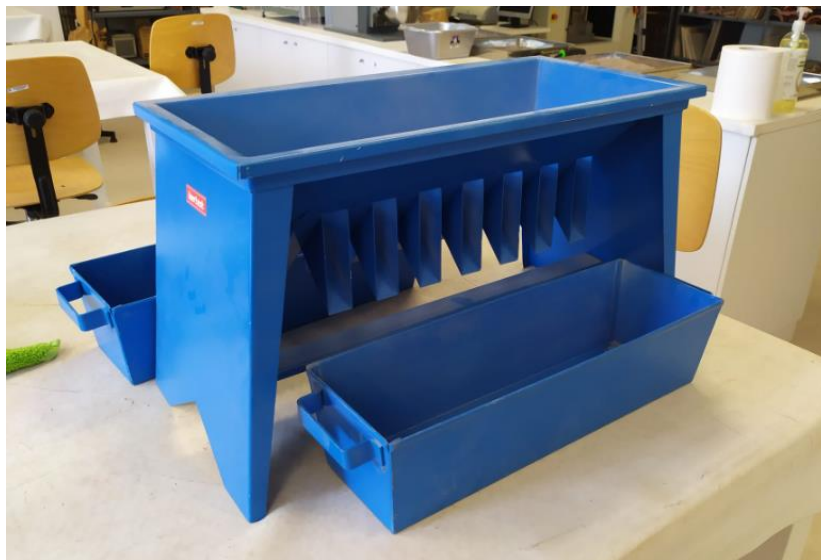


Figura 7. Dosificadora de áridos.



Figura 8. Proceso de tamizado y pesado de grava caliza durante el ensayo de granulometría.

La Instrucción de Hormigón Estructural marca los límites superiores e inferiores de la granulometría de los áridos finos. Estos límites deben comprender toda aquella arena que quiera ser utilizada para fabricar hormigón estructural. Este estudio comprueba dichos límites con la granulometría de la arena porcelánica y la arena caliza. En la Tabla 2 se muestran dichos valores.

Tabla 2. Valores límite inferior y superior para granulometría de arenas marcados por EHE08.

| f (mm) | inferior-EHE08 | | superior-EHE08 | |
|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|
| | % retenido acumulado | % pasa | % retenido acumulado | % pasa |
| 8 | 0% | 100% | 0% | 100% |
| 5 | 0% | 100% | 0% | 100% |
| 4 | 15% | 85% | 0% | 100% |
| 2 | 38% | 62% | 4% | 96% |
| 1 | 60% | 40% | 16% | 84% |
| 0,5 | 82% | 18% | 40% | 60% |
| 0,25 | 94% | 6% | 70% | 30% |
| 0,125 | 100% | 0% | 77% | 23% |
| 0,063 | 100% | 0% | 84% | 16% |

3.1.1.2.1. Cálculos

Los datos que obtener en este ensayo son:

- El peso retenido en cada uno de los tamices utilizados. Este valor se obtiene a partir del pesaje del material retenido en cada tamiz. Para los áridos gruesos se comienza por el tamiz de 10 mm, mientras que para los áridos finos se comienza por el de 4 mm. El material retenido en cada tamiz se pesa utilizando un recipiente tarada encima de la báscula y vertiendo el material desde el tamiz al recipiente. Posteriormente, se anota el valor resultante

- El porcentaje de material retenido en cada tamiz. Este valor se calcula dividiendo el peso del material retenido en cada tamiz por la suma del peso del material de cada uno de los tamices.

$$\% \text{ retenido }_i = \frac{\text{Retenido }_i \text{ (g)}}{\sum \text{retenido }_i \text{ (g)}}$$

- El porcentaje de material retenido acumulado en cada tamiz. Este valor se obtiene a partir del cálculo previo más el valor del porcentaje acumulado del tamiz anterior. Es decir, se obtiene a partir de la suma progresiva del porcentaje retenido en cada tamiz. Cuantifica la cantidad de material que se ha ido quedando en ese tamiz y en los anteriores de mayor tamaño.

$$\% (\text{retenido acumulado})_i = \frac{\text{Retenido}_i \text{ (g)}}{\sum \text{retenido}_i \text{ (g)}} + \% (\text{retenido acumulado})_{i-1}$$

- El porcentaje de material que pasa por el tamiz a un nivel inferior. Se obtiene como la inversa del valor previo y cuantifica la cantidad de material que pasa por el tamiz que se está evaluando.

$$\% \text{ pasa }_i = 1 - \% (\text{retenido acumulado})_i$$

A partir de estos datos se debe representar la gráfica que representa el porcentaje retenido acumulado respecto al tamaño del tamiz.

3.1.1.2.2. Resultados

El ensayo se ha realizado sobre dos tipos de áridos: material porcelánico (árido reciclado) y material calizo (árido convencional). Los dos áridos se pueden encontrar en dos granulometrías distintas, las correspondientes a áridos finos y áridos gruesos. Además, se han recogido para alguno de estos grupos dos muestras para realizar el ensayo o, en otro caso, se ha repetido el ensayo sobre la misma muestra para conseguir una mayor información sobre el árido que se está estudiando. A continuación, se muestran los grupos de árido que se han estudiado:

- GP-G-1. Primer ensayo de grava porcelánica.
- GP-G-2. Segundo ensayo de grava porcelánica con la misma muestra.
- CAL-G-M1. Primera muestra de grava caliza.
- CAL-G-M2. Segunda muestra de grava caliza.
- GP-A-M1. Primera muestra de arena porcelánica.
- GP-A-M2. Segunda muestra de arena porcelánica.
- GP-A. Media de las dos muestra de arena porcelánica.
- CAL-A-M1. Primera muestra de arena caliza.
- CAL-A-M2. Segunda muestra de arena caliza.
- CAL-A-1. Media de las dos primeras muestras de arena caliza.
- CAL-A-2. Nueva muestra de arena caliza.

En la Tabla 3 se muestran los resultados del primer y segundo ensayo sobre grava porcelánica.

Tabla 3. Resultados del primer y segundo ensayo sobre grava porcelánica.

| f (mm) | GP-G-1 | | | GP-G-2 | | |
|------------|--------------|----------------------|--------|--------------|----------------------|--------|
| | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa |
| 16 | 0 | 0% | 100% | 0 | 0% | 100% |
| 10 | 0 | 0% | 100% | 487,1 | 27,14% | 72,86% |
| 8 | 1429,1 | 83,23% | 16,77% | 857,6 | 74,93% | 25,07% |
| 5 | - | - | - | 443,7 | 99,65% | 0,35% |
| 4 | 259,8 | 98,36% | 1,64% | 0,0 | 99,65% | 0,35% |
| 2 | 1,2 | 98,43% | 1,57% | 0,0 | 99,65% | 0,35% |
| 1 | 2,5 | 98,57% | 1,43% | 0,0 | 99,65% | 0,35% |
| 0,5 | 3,3 | 98,77% | 1,23% | 0,0 | 99,65% | 0,35% |
| 0,25 | 3,2 | 98,95% | 1,05% | 0,0 | 99,65% | 0,35% |
| 0,125 | 0,7 | 98,99% | 1,01% | 0,0 | 99,65% | 0,35% |
| 0,063 | 6,2 | 99,35% | 0,65% | 0,0 | 99,65% | 0,35% |
| Fondo | 11,1 | 100,00% | 0,00% | 6,3 | 100,00% | 0,00% |
| Masa Total | 1717,1 | Pérdida de material | | 1794,7 | Pérdida de material | |
| Inicial | 1717,2 | 0,01% | | 1797,9 | 0,18% | |

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los ensayos sobre la primera y segunda muestra de grava caliza.

Tabla 4. Resultados de los ensayos sobre la primera y segunda muestra de grava caliza.

| f (mm) | CAL-G-M1 | | | CAL-G-M2 | | |
|------------|--------------|----------------------|--------|--------------|----------------------|--------|
| | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa |
| 16 | 0 | 0% | 100% | 0 | 0% | 100% |
| 10 | - | - | - | 271,10 | 17,34% | 82,66% |
| 8 | 772,38 | 45,24% | 54,76% | 310,90 | 37,24% | 62,76% |
| 5 | - | - | - | 697,60 | 81,87% | 18,13% |
| 4 | 822,04 | 93,40% | 6,60% | 181,70 | 93,49% | 6,51% |
| 2 | 64,13 | 97,15% | 2,85% | 54,70 | 96,99% | 3,01% |
| 1 | 17,42 | 98,17% | 1,83% | 17,40 | 98,11% | 1,89% |
| 0,5 | 9,47 | 98,73% | 1,27% | 5,50 | 98,46% | 1,54% |
| 0,25 | 4,30 | 98,98% | 1,02% | 3,80 | 98,70% | 1,30% |
| 0,125 | 3,50 | 99,19% | 0,81% | 5,30 | 99,04% | 0,96% |
| 0,063 | 9,10 | 99,72% | 0,28% | 9,30 | 99,64% | 0,36% |
| Fondo | 4,80 | 100,00% | 0,00% | 5,70 | 100,00% | 0,00% |
| Masa Total | 1707,1 | Pérdida de material | | 1563,0 | Pérdida de material | |
| Inicial | 1708,63 | 0,09% | | 1565,30 | 0,15% | |

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los ensayos sobre la primera y segunda muestra de arena porcelánica.

Tabla 5. Resultados de los ensayos sobre la primera y segunda muestra de arena porcelánica.

| f (mm) | GP-A M1 | | | GP-A M2 | | | GP-A (Media) | |
|------------|--------------|----------------------|--------|--------------|----------------------|--------|----------------------|--------|
| | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa | % retenido acumulado | % pasa |
| 8 | 0 | 0% | 100% | 0 | 0% | 100% | 0% | 100% |
| 5 | - | - | - | 179,80 | 32,66% | 67,34% | 32,66% | 67,34% |
| 4 | 295,60 | 52,96% | 47,04% | 99,60 | 50,74% | 49,26% | 51,85% | 48,15% |
| 2 | 163,50 | 82,25% | 17,75% | 219,40 | 90,59% | 9,41% | 86,42% | 13,58% |
| 1 | 53,10 | 91,76% | 8,24% | 42,10 | 98,24% | 1,76% | 95,00% | 5,00% |
| 0,5 | 17,50 | 94,89% | 5,11% | 5,20 | 99,18% | 0,82% | 97,04% | 2,96% |
| 0,25 | 9,10 | 96,52% | 3,48% | 0,60 | 99,29% | 0,71% | 97,91% | 2,09% |
| 0,125 | 6,10 | 97,62% | 2,38% | 0,20 | 99,33% | 0,67% | 98,47% | 1,53% |
| 0,063 | 5,50 | 98,60% | 1,40% | 2,00 | 99,69% | 0,31% | 99,15% | 0,85% |
| Fondo | 7,80 | 100,00% | 0,00% | 1,70 | 100,00% | 0,00% | 100,00% | 0,00% |
| Masa Total | 558,2 | Pérdida de material | | 550,6 | Pérdida de material | | | |
| Inicial | 559,50 | 0,23% | | 550,10 | -0,09% | | | |

En la Tabla 6 se muestran los resultados de los ensayos sobre la primera y segunda muestra de arena caliza y su media.

Tabla 6. Resultados de los ensayos sobre la primera y segunda muestra de arena caliza y su media.

| f (mm) | CAL-A-M1 | | | CAL-A M2 | | | CAL-A-1 | |
|------------|--------------|----------------------|--------|--------------|----------------------|--------|----------------------|--------|
| | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa | % retenido acumulado | % pasa |
| 8 | 0 | 0% | 100% | 0 | 0% | 100% | 0% | 100% |
| 5 | 0 | 0% | 100% | 0 | 0% | 100% | 0% | 100% |
| 4 | 18,30 | 2,81% | 97,19% | 5,89 | 1,08% | 98,92% | 1,94% | 98,06% |
| 2 | 231,70 | 38,38% | 61,62% | 74,00 | 14,59% | 85,41% | 26,49% | 73,51% |
| 1 | 166,20 | 63,89% | 36,11% | 105,81 | 33,92% | 66,08% | 48,91% | 51,09% |
| 0,5 | 80,50 | 76,25% | 23,75% | 86,90 | 49,80% | 50,20% | 63,02% | 36,98% |
| 0,25 | 47,60 | 83,56% | 16,44% | 70,92 | 62,75% | 37,25% | 73,15% | 26,85% |
| 0,125 | 53,10 | 91,71% | 8,29% | 75,50 | 76,54% | 23,46% | 84,13% | 15,87% |
| 0,063 | 33,10 | 96,79% | 3,21% | 75,30 | 90,30% | 9,70% | 93,54% | 6,46% |
| Fondo | 20,90 | 100,00% | 0,00% | 53,12 | 100,00% | 0,00% | 100,00% | 0,00% |
| Masa Total | 651,4 | Pérdida de material | | 547,4 | Pérdida de material | | | |
| Inicial | 655,40 | 0,61% | | 549,20 | 0,32% | | | |

En la Tabla 7 se muestran los resultados del ensayo de la segunda nueva muestra de arena caliza.

Tabla 7. Resultados del ensayo de la segunda nueva muestra de arena caliza.

| CAL-A-2 | | | |
|------------|--------------|----------------------|--------|
| f (mm) | Retenido (g) | % retenido acumulado | % pasa |
| 8 | 0 | 0% | 100% |
| 5 | 0 | 0% | 100% |
| 4 | 70,90 | 7,80% | 92,20% |
| 2 | 124,90 | 21,54% | 78,46% |
| 1 | 187,80 | 42,20% | 57,80% |
| 0,5 | 133,00 | 56,84% | 43,16% |
| 0,25 | 121,30 | 70,18% | 29,82% |
| 0,125 | 117,80 | 83,14% | 16,86% |
| 0,063 | 101,10 | 94,27% | 5,73% |
| Fondo | 52,10 | 100,00% | 0,00% |
| Masa Total | 908,9 | | |
| Inicial | 913,10 | 0,46% | |

En la Figura 9 se muestra la comparativa de la granulometría de las diferentes gravas y en la Figura 10 se muestra la comparativa de la granulometría de las arenas y la comprobación del cumplimiento del EHE08.

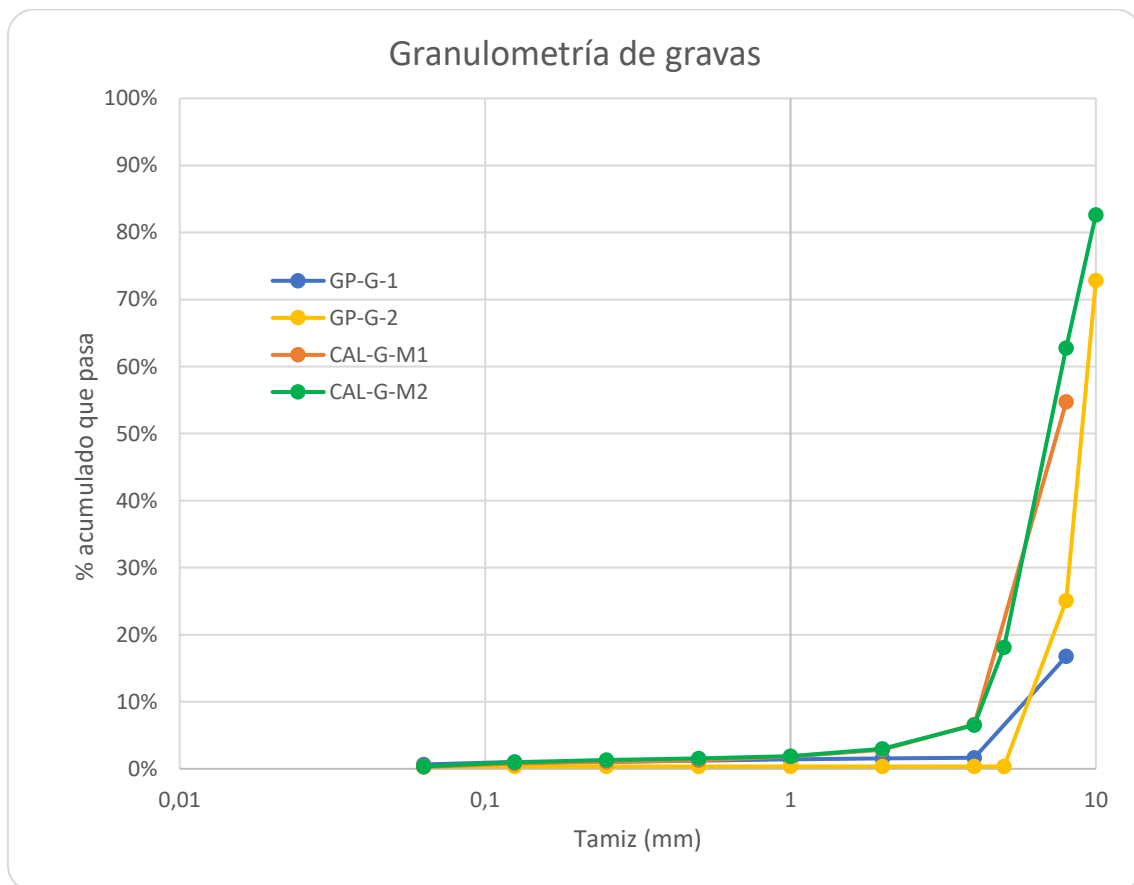


Figura 9. Comparativa de la granulometría de las diferentes gravas.

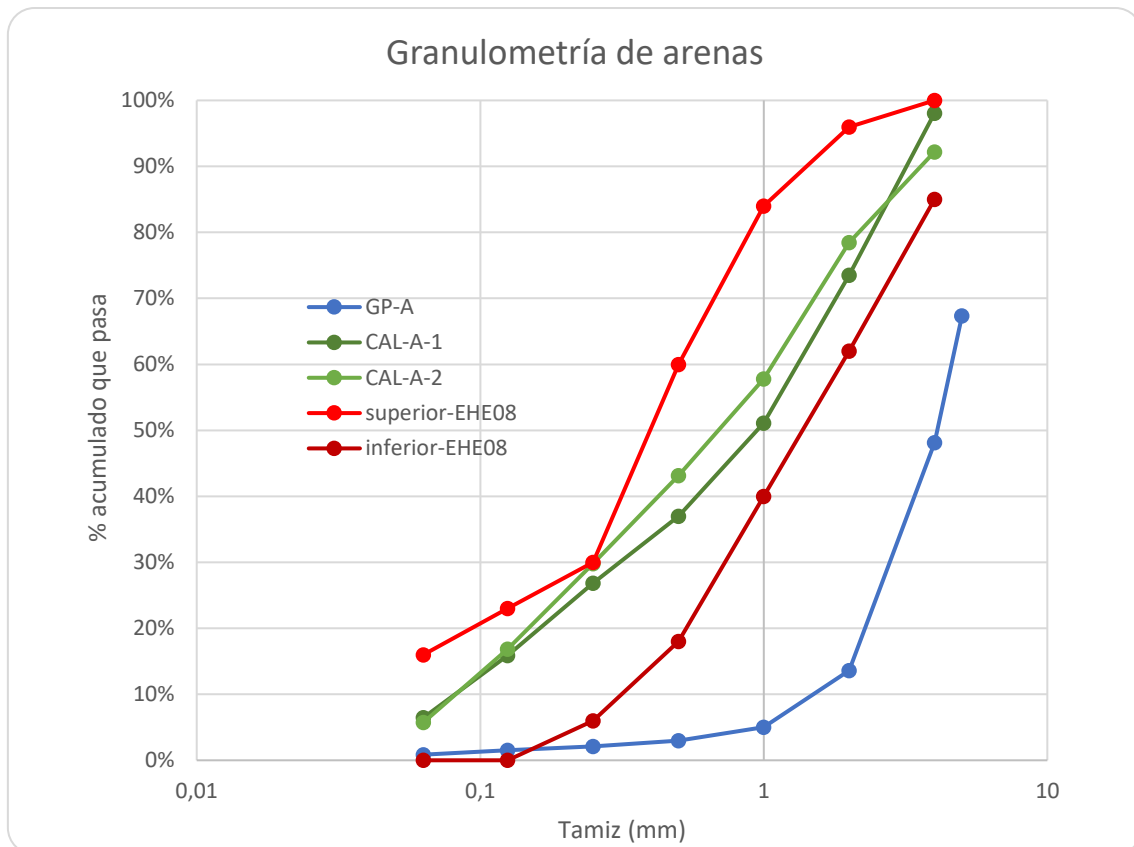


Figura 10. Comparativa de granulometría de las diferentes arenas y comprobación del cumplimiento del EHE08.

3.1.1.2.3. Observaciones del ensayo de granulometría

Antes de nada, se observa cómo los resultados de la arena porcelánica GP-A M2 comienzan en el tamiz de 5 mm debido a que en la primera muestra de la arena porcelánica GP-A M1 existe una gran cantidad de material retenido por el tamiz de 4 mm. De esta forma se consigue conocer mejor la distribución en cuanto a granulometría de esta arena que, como se explica a continuación, está formada por partículas grandes.

Se observa como la granulometría de la grava porcelánica es semejante a la caliza, aunque se observa una ligera desviación en la Figura 9, el cual indica una mayor existencia de partículas gruesas en el árido grueso porcelánico. La grava porcelánica, entonces, tiene una mayor proporción de árido grueso en el rango que va desde los 4 a los 10 mm.

Respecto a las arenas en la Figura 10, aquí la diferencia es mucho más notable. Además de los datos de las arenas porcelánica y caliza, también se ha representado el límite superior e inferior según la normativa sobre la granulometría que deben tener los áridos finos en el hormigón estructural. La arena porcelánica se sitúa muy por debajo del límite inferior permitido, es decir, que hay un mayor porcentaje de árido grueso en la arena, comparándolo tanto con la normativa como con la arena caliza. Esto es algo que se observa a simple vista comparando el aspecto de las dos arenas estudiadas. La arena porcelánica está formada por partículas de mayor tamaño que le otorgan un aspecto de grava fina, mientras que la arena caliza tiene el aspecto de una arena convencional utilizada en la fabricación de hormigón (Figura 11).



Figura 11. Comparativa entre arena porcelánica (izquierda) y arena caliza (derecha).

A partir de estos análisis se afirma que la granulometría del material porcelánico tiene una distribución compleja. Esto significa que el tamaño de las partículas, tanto para la arena como para la grava, aunque se pronuncia más en el árido fino, es muy semejante para la gran mayoría del material.

3.1.1.3. Densidad de partículas y absorción de agua

La densidad de las partículas que componen los áridos y la absorción de agua de dicho material se obtiene a partir del ensayo realizado siguiendo la normativa UNE-EN 1097-6. Los ensayos utilizados para el estudio de estas propiedades difieren según el tamaño del árido que se esté estudiando. En este caso, se van a realizar ensayos sobre finos y gruesos (Figura 12), por lo que los ensayos para cada uno de ellos serán distintos.



Figura 12. Grava y arena sumergidas para poder pesar la masa con superficie seca y saturada de agua. También para realizar sobre la arena el ensayo de densidad.

3.1.1.3.1. Procedimiento para áridos finos

El procedimiento seguido para determinar la densidad de las partículas y la absorción de agua de los áridos finos, tanto del árido porcelánico como del árido calizo, corresponde al método del picnómetro para las partículas de árido que pasen el tamiz de ensayo de 4 mm y queden retenidas en el tamiz de ensayo de 0,063 mm.

La toma de muestras de los áridos debe respetar la Norma EN 932-1 y la reducción de masa debe realizarse de acuerdo con la Norma EN 932-2. Una vez obtenida la masa se procede a su lavado inicial por el tamiz de 0,063 mm para eliminar las partículas más finas.

Posteriormente, se sumerge la muestra en un depósito que contiene agua a una temperatura de 22°C durante 24 horas. Para determinar el estado saturado en superficie seca se extiende la muestra en una bandeja (Figura 14) y se expone a una corriente suave de aire caliente, moviendo el árido frecuentemente para que el secado sea uniforme. La comprobación se realiza mediante la prueba del molde cónico. El árido es introducido dentro del molde sin ser prensado completamente, se enrasa por la superficie superior y se retira el molde para observar el comportamiento del árido (Figura 15 y Figura 16). Se alcanza el estado de superficie seca cuando el árido, una vez retirado el molde cónico, colapsa casi completamente, pero se observa un pico definido y pendientes angulares (Figura 17).

La muestra en estas condiciones se pasa a un picnómetro y se registra su peso. Seguido se introduce agua y se agita para eliminar el aire atrapado, para dejarlo reposar en un baño termostático. Posteriormente se procede a pesar el picnómetro que contiene el árido y el agua añadida. Una vez registrado dicho valor, se procede a vaciar sobre una bandeja el contenido del picnómetro y a rellenarlo de agua para su posterior pesado (Figura 13).

Por último, se procede a secar la muestra en el horno a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Una vez se consigue esto, se pesa la muestra para obtener la masa seca.



Figura 13. Izquierda: picnómetro con arena enrasado con agua para su pesado. Derecha: picnómetro lleno de agua para ser pesado.



Figura 14. Arena húmeda lista para ser secada con corriente de aire caliente.



Figura 15. Izquierda: primer cono para comprobar la humedad de la arena caliza durante el ensayo de absorción. Muy compacto, por lo que existe aún mucha humedad. Derecha: segundo ensayo de cono para comprobar la humedad de la arena. Arena saturada, pero con superficie seca.

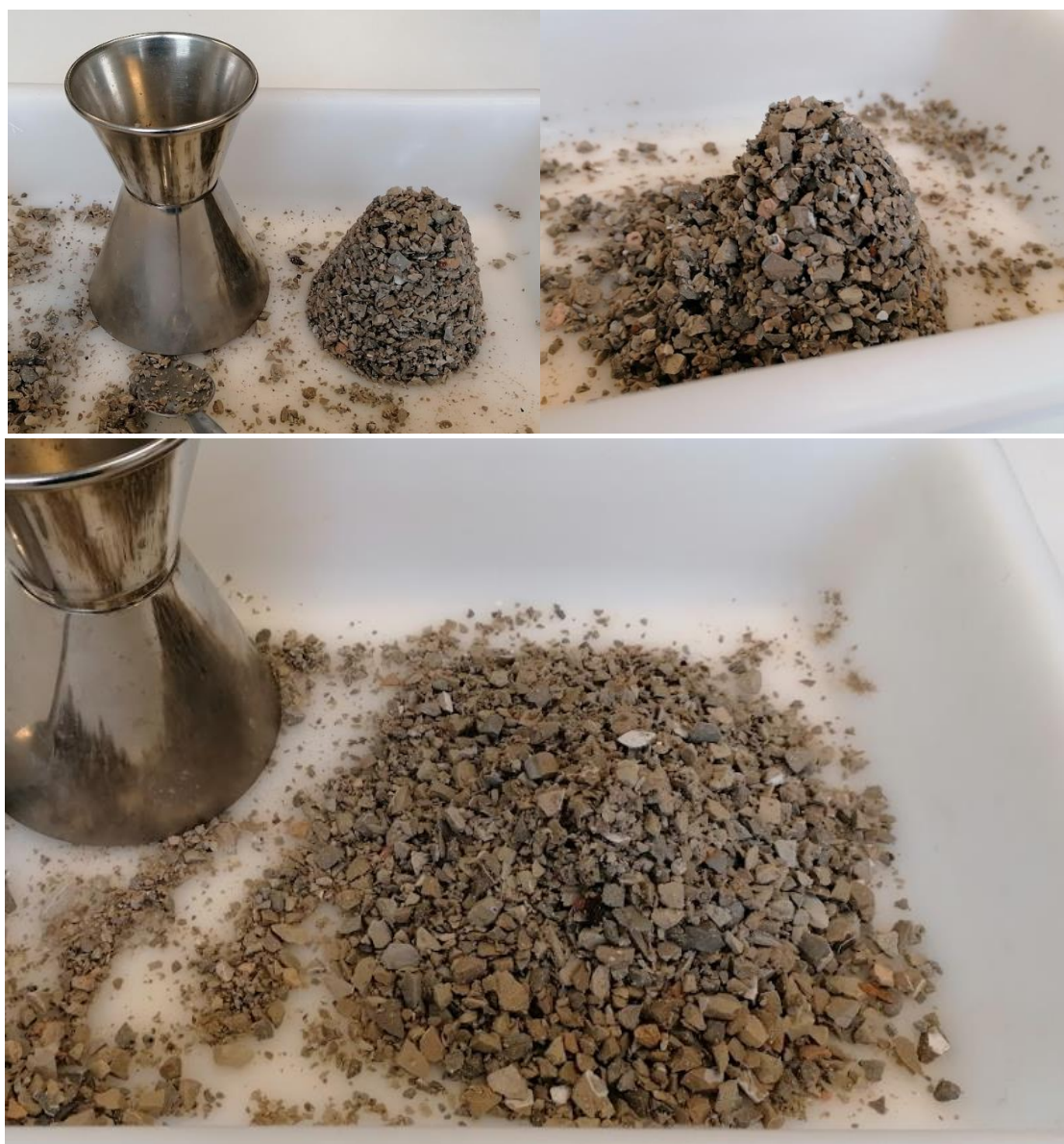


Figura 16. Proceso de comprobación del estado de árido saturado con superficie seca sobre la arena porcelánica. Izquierda superior: arena húmeda. Derecha superior: arena menos húmeda. Inferior: arena porcelánica saturada, pero con superficie seca.



Figura 17. Norma UNE-EN 1097-6. Izquierda superior: árido húmedo, casi mantiene la forma completa del molde metálico. Derecha superior: árido ligeramente húmedo, se observa depresión apreciable. Inferior: árido saturado superficialmente secado, casi completamente colapsado, pero con un pico definido todavía visible y pendientes angulares.

3.1.1.3.2. Procedimiento para áridos gruesos

El procedimiento seguido para determinar la densidad de las partículas y la absorción de agua de los áridos gruesos, tanto del árido porcelánico como del árido calizo, corresponde al método del picnómetro para las partículas de árido que pasen el tamiz del ensayo de 31,5 mm y quedan retenidas en el tamiz de 4 mm.

La toma de muestras de los áridos debe respetar la Norma EN 932-1 y la reducción de masa debe realizarse de acuerdo con la Norma EN 932-2. Una vez obtenida la masa se procede a su lavado inicial por el tamiz de 4 mm para eliminar las partículas más finas.

Inicialmente, la muestra se introduce en el picnómetro junto con agua, extrayendo el aire, hasta rellenarlo completamente. Este se seca por la parte exterior, se pesa y se registra el valor. Posteriormente, se rellena el picnómetro de agua y se procede de la misma manera, limpiando el exterior y registrando el peso dado en la báscula del picnómetro relleno solo de agua.

El árido previamente extraído (Figura 18) se debe tratar retirando el agua de la superficie hasta que este adquiera un aspecto opaco mediante paños secos (Figura 19). Se procede a su pesado para obtener la masa saturada con superficie seca.

Por último, la muestra de árido se introduce en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener una masa constante, que será pesada una vez se enfríe para obtener la masa seca.



Figura 18. Grava húmeda lista para ser secada con toallas.



Figura 19. Izquierda: grava húmeda antes de ser secada. Derecha: grava con superficie seca saturada.

3.1.1.3.3. Cálculos

Para el caso de los áridos finos se deben calcular los siguientes parámetros.

- Densidad aparente de partículas.

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

- Densidad de partículas secadas en estufa.

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente.

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Absorción de agua.

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4}$$

Donde:

- M_1 es la masa del árido saturado y secado superficialmente pesado al aire, en gramos.
- M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra de árido saturado y el agua, en gramos.
- M_3 es la masa del picnómetro solo lleno con agua, en gramos.
- M_4 es la masa de la porción de ensayo secada en estufa pesada al aire, en gramos.

En el caso de los áridos gruesos, los parámetros que calcular son los mostrados a continuación.

- Densidad aparente de partículas.

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

- Densidad de partículas secadas en estufa.

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente.

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Absorción de agua.

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4}$$

Donde:

- ρ_w es la densidad del agua a temperatura de ensayo, en megagramos por metro cúbico.
- M_1 es la masa del árido saturado con la superficie seca, pesada al aire, expresada en gramos.
- M_2 es la masa aparente en el agua de la cesta que contiene la muestra de árido saturado, expresada en gramos.
- M_3 es la masa aparente en el agua de la cesta vacía, expresada en gramos.
- M_4 es la masa de la porción de ensayo secada en estufa pesada al aire, en gramos.

En los ensayos realizados se han utilizado dos valores diferentes de M_4 . El primero de ellos se ha obtenido de forma rápida sin utilizar el picnómetro secando primeramente el material de muestra con paños secos y posteriormente con el horno a una temperatura de $110\pm 5^\circ\text{C}$, para poder comenzar con el proceso de amasado de los distintos tipos de hormigón. Por otra parte, el segundo valor se ha obtenido siguiendo el procedimiento de la norma explicado previamente en el que se utiliza el picnómetro.

3.1.1.3.4. Resultados

Para calcular la absorción de agua de las partículas solo es necesario conocer el valor de la masa saturada con superficie seca y la masa secada en estufa. En este caso, la absorción de agua se ha calculado para las gravas y arenas porcelánica y caliza. Cabe destacar que se ha realizado una nueva medida de la absorción de la arena caliza debido a que existía bastante diferencia con la grava caliza, teniendo en cuenta que están almacenadas en el mismo ambiente, tanto de humedad como de temperatura. Además, después de las amasadas de las probetas utilizadas en los ensayo de compresión y tracción indirecta, se ha agotado por completo el depósito de arena y grava caliza, por lo que se ha tenido que reponer, calculando así un nuevo valor de absorción de estos materiales. La densidad no se ha vuelto a calcular teniendo en cuenta que su procedencia es la misma y la posible diferencia entre los dos cargamentos es despreciable.

En cuanto a la densidad, esta ha sido calculada a partir de los datos de masa mostrados en el apartado anterior. En este caso, para las gravas porcelánica y caliza, se ha calculado la masa saturada con superficie seca mediante el picnómetro, ya que este valor que se ha utilizado para calcular la absorción se había obtenido previamente mediante el procedimiento descrito anteriormente, para el caso de las gravas.

En la Tabla 8 se muestran los resultados de la masa saturada con superficie seca (M_1), de la masa secada en estufa (M_4) y de la absorción de agua de las gravas y arenas porcelánica y caliza (WA).

Tabla 8. Resultados de la masa saturada con superficie seca (M_1), de la masa secada en estufa (M_4) y de la absorción de agua de las gravas y arenas porcelánica y caliza (WA).

| | M1 (g) Psat - Abs. | M4 (g) Pm - Abs. | WA (%) Abs. |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| GP-G | 1596,24 | 1568,7 | 1,76% |
| CAL-G | 1492,97 | 1461,5 | 2,15% |
| GP-A | 336,78 | 328,6 | 2,49% |
| CAL-A | 390,16 | 388,5 | 0,43% |
| CAL-A- Rep. | 404,2 | 402,6 | 0,40% |
| CAL-A (Nueva) | 289,7 | 280,1 | 3,43% |
| CAL-G (Nueva) | 1151,7 | 1133,6 | 1,60% |

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la de la masa saturada con superficie seca (M_1), de la masa del picnómetro con árido y agua (M_2), de la masa del picnómetro con agua (M_3), de la masa secada en estufa (M_4) y de la densidad aparente de partículas (ρ_a), la densidad de

partículas secas (ρ_{rd}) y la densidad de partículas saturadas con superficie seca (ρ_{ssd}) de todos los materiales estudiados.

Tabla 9. Resultados de la de la masa saturada con superficie seca (M1), de la masa del picnómetro con árido y agua (M2), de la masa del picnómetro con agua (M3), de la masa secada en estufa (M4) y de la densidad aparente de partículas (ρ_a), la densidad de partículas secas (ρ_{rd}) y la densidad de partículas saturadas con superficie seca (ρ_{ssd}) de todos los materiales estudiados.

| | M1 (g) Psat - Picnóm. | M2 (g) Ppam | M3 (g) Ppa | M4 (g) Pm - Picnóm. | ρ_a (kg/m3) | ρ_{rd} (kg/m3) | ρ_{ssd} (kg/m3) |
|---------------|--------------------------|----------------|---------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|
| GP-G | 915,19 | 2142,1 | 1621,6 | 899,4 | 2373,7 | 2278,8 | 2318,8 |
| CAL-G | 1040,64 | 2272,7 | 1621,6 | 1018,7 | 2771,2 | 2615,2 | 2671,5 |
| GP-A | 336,78 | 1816,63 | 1623,63 | 328,6 | 2423,3 | 2285,4 | 2342,3 |
| CAL-A | 390,16 | 1875,72 | 1623,87 | 388,5 | 2843,0 | 2808,9 | 2820,9 |
| CAL-A- Rep. | 404,2 | - | - | - | - | - | - |
| CAL-A (Nueva) | 289,7 | 1800 | 1619,1 | 280,1 | 2823,6 | 2574,4 | 2662,7 |
| CAL-G (Nueva) | 1151,7 | - | - | - | - | - | - |

Se observa en la Tabla 8 cómo la grava porcelánica (GP-G) tiene unos valores de absorción menores que los de la grava caliza (CAL-G), siendo esta ligeramente superior en este aspecto respecto a la grava caliza. Respecto a la absorción en arenas, se observa en la Tabla 9 cómo la arena porcelánica (GP-A) se encuentra en medio de la arena caliza inicial (CAL-A) y la arena caliza nueva (CAL-A (Nueva)), siendo todos estos valores razonables.

A partir de estos ensayos, se deben tomar ciertos valores para el cálculo posterior de las dosificaciones. En este caso es necesario conocer los valores para los áridos finos y gruesos tanto del material calizo como del porcelánico. Estos valores se ven reflejados en la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 10. Densidad de los áridos porcelánico y calizo para el cálculo de las dosificaciones extraída de los ensayos de densidad de los áridos según la Norma UNE-EN 1097-6.

| Densidad (tonelada/m ³) | | | | |
|-------------------------------------|------|------|-------|-------|
| | GP-A | GP-G | CAL-A | CAL-G |
| Ensayo | 2,3 | - | 2,8 | - |
| Tomado dosificaciones | 2,3 | 2,3 | 2,7 | 2,7 |

Tabla 11. Absorción de agua de los áridos porcelánico y calizo para el cálculo de las dosificaciones extraída de los ensayos de absorción de agua según la Norma UNE-EN 1097-6.

| Absorción de agua (%) | | | | |
|-----------------------|------|------|-------|-------|
| | GP-A | GP-G | CAL-A | CAL-G |
| Ensayo | 2,5 | 1,76 | 0,43 | 2,15 |
| Tomado dosificaciones | 2,5 | 1,8 | 0,4 | 2,1 |

Tabla 12. Humedad de los áridos porcelánico y calizo para el cálculo de las dosificaciones.

| Humedad (%) | | | | |
|-----------------------|------|------|-------|-------|
| | GP-A | GP-G | CAL-A | CAL-G |
| Ensayo | 1,34 | 0,2 | - | - |
| Tomado dosificaciones | 1,3 | 0,2 | 0 | 0 |

Se observa cómo existen dos valores para casi todos los áridos, uno correspondiente al ensayo y el otro que indica aquello que se ha tomado para el cálculo de las dosificaciones.

En cuanto a la densidad, se observa cómo solo tienen valor de ensayo las arenas, tanto caliza como porcelánica. Esto se debe a que un solo valor es representativo tanto para arena como para grava. El valor de esta densidad, a pesar de que estrictamente debería ser extraído del valor de densidad aparente de partículas del ensayo de densidad, se ha obtenido a partir de una media entre los tres valores obtenidos, ya que la desviación entre estos no es considerable. También es destacable que, a pesar de obtener un valor de densidad para el árido calizo de 2,8 ton/m³, un valor habitual para este tipo de árido convencional está entre 2,6 y 2,7 ton/m³, por lo que la solución ha sido adquirir un valor de 2,7 ton/m³ para las dosificaciones de las amasadas, que es el valor más cercano, dentro de lo habitual, al valor obtenido en el ensayo de densidad.

En cuanto a la absorción de agua, se observa cómo los valores del ensayo, explicados y expuesto en el apartado previo del ensayo de absorción, son más precisos que los tomados para el cálculo de las dosificaciones. Esto se debe a que al realizar las amasadas no se va a poder llegar a ese nivel de precisión y, en consecuencia, se ha preferido redondear los valores.

En cuanto a la humedad, el redondeo es el mismo en este caso, pero, además, se observa como el valor de humedad de los áridos calizos son nulos. Esto se debe a que el ambiente en el que se encuentran almacenados estos áridos está controlado para que la humedad sea mínima.

Para el cálculo de la humedad, lo que se realiza es el pesaje inicial de una muestra de árido para posteriormente calentarlo en un horno a una temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ para que la humedad se evapore y realizar, pasadas 24 horas, un segundo pesaje (Figura 20). La diferencia de peso entre estos dos pesajes corresponde a la humedad existente en el árido.



Figura 20. Muestra de grava porcelánica tras su segundo pesaje. Se observa en la nota escrita el peso del primer y segundo pesaje, así como del valor de la humedad resultante.

3.1.2. Fabricación y ensayo de hormigones con áridos reciclados

Tal y como se ha expuesto en los apartados introductorios, el objetivo de este proyecto es fabricar distintos tipos de hormigón en los que se varía el porcentaje de sustitución de los áridos convencionales por áridos reciclados, en este caso, de origen cerámico.

Para estos hormigones se realizarán diversos ensayos que determinarán las propiedades y las prestaciones de cada uno de ellos para determinar el cumplimiento de la normativa del hormigón estructural.

3.1.2.1. Tipos de hormigón según el grado de sustitución de áridos reciclados

Con tal de observar los cambios en las características y prestaciones de los distintos tipos de hormigón estructural, la sustitución se ha realizado empezando por el porcentaje que marca la normativa de un 20%. Este porcentaje solo implica a los áridos gruesos, pero en el estudio se ha querido aplicar también a los áridos finos. A partir de aquí, el porcentaje de sustitución ha ido en aumento, implicando una cantidad mayor de árido reciclado en la fabricación del hormigón. Para observar mejor los resultados y poder extraer conclusiones más certeras, se ha decidido

para cada tipo de hormigón, sustituir o solo los finos o solo los gruesos, es decir, no realizar sustitución en ambos tipos de árido.

A continuación, se explican los distintos tipos de hormigón estructural que se han estudiado, teniendo en cuenta las combinaciones y el porcentaje de sustitución de cada uno de ellos.

- REF: hormigón estructural fabricado con los áridos convencionales sobre el cual se compararán los resultados de los demás hormigones (Figura 21).

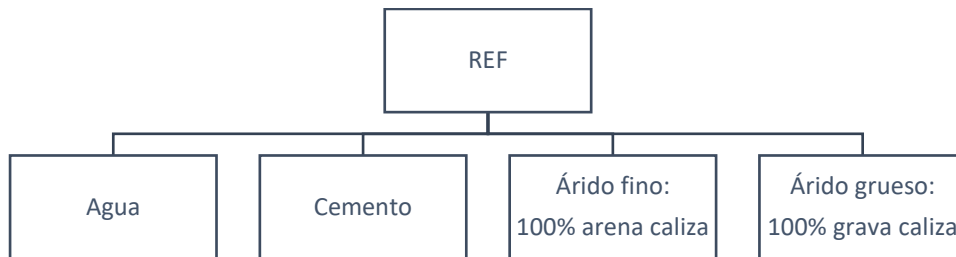


Figura 21. Composición del hormigón REF.

- GP20: hormigón estructural con un porcentaje de sustitución de árido grueso del 20%. Esto significa que el 20% del árido grueso es árido reciclado porcelánico (grava porcelánica), mientras que el 80% restante sigue siendo árido grueso convencional. El árido fino es 100% árido convencional (Figura 22).



Figura 22. Composición del hormigón GP20.

- GP50: hormigón estructural con un porcentaje de sustitución de árido grueso del 50%. El árido fino es 100% árido convencional (Figura 23).



Figura 23. Composición del hormigón GP50.

- GP100: hormigón estructural con un porcentaje de sustitución de árido grueso del 100%. El árido fino es 100% árido convencional (Figura 24).



Figura 24. Composición del hormigón GP100.

- AP20: hormigón estructural con un porcentaje de sustitución del árido fino del 20%. Esto significa que el 20% del árido fino es árido reciclado porcelánico (arena porcelánica), mientras que el 80% restante sigue siendo árido grueso convencional. El árido grueso es 100% árido convencional (Figura 25).

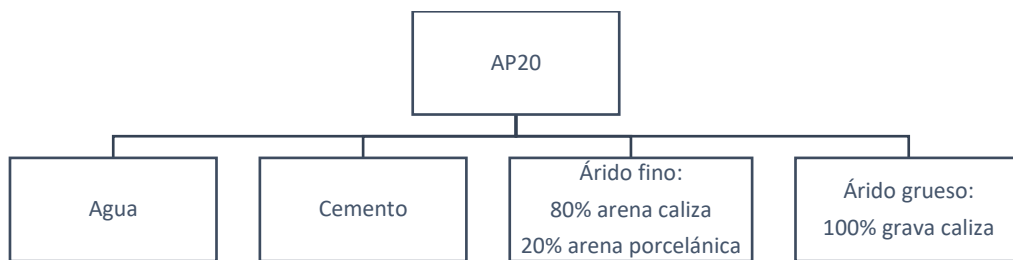


Figura 25. Composición del hormigón AP20.

- AP50: hormigón estructural con un porcentaje de sustitución del árido fino del 50%. El árido grueso es 100% árido convencional (Figura 26).



Figura 26. Composición del hormigón AP50.

- AP100: hormigón estructural con un porcentaje de sustitución del árido fino del 100%. El árido grueso es 100% árido convencional (Figura 27).

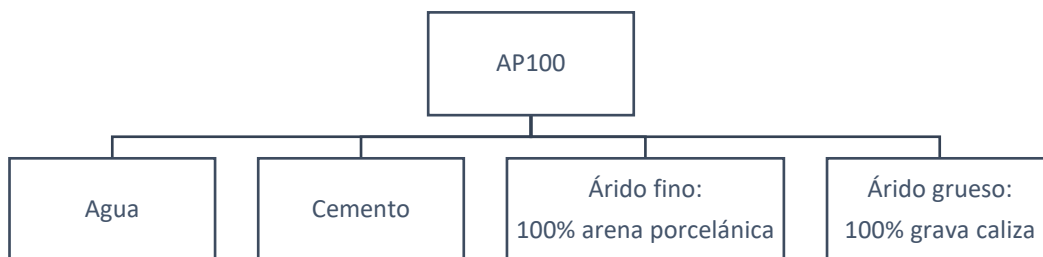


Figura 27. Composición del hormigón AP100.

Como se observa, existen cinco tipos de hormigón que retan la normativa vigente respecto a la proporción de árido reciclado. Estos son: AP20, AP50, AP100, GP50 y GP100. Las series AP suponen sustituir el árido fino del hormigón por árido reciclado, algo que la normativa solo considera para áridos gruesos. Además, las series GP mencionadas superan el porcentaje de sustitución permitido por la normativa. Una vez realizados los ensayos pertinentes, el estudio proporcionará datos suficientes como para determinar si este tipo de árido es meritorio de poder ser utilizado en la fabricación de hormigón estructural de forma más agresiva de la que ahora puede ser utilizado.

Y además de todo esto, en general, todos los tipos de hormigón mostrados retan a la normativa respecto al material utilizado para su fabricación, ya que los residuos cerámicos no están contemplados como árido reciclado.

3.1.2.2. Fabricación del hormigón

3.1.2.2.1. Dosificaciones para la fabricación del hormigón

En este apartado se tratan las cantidades y proporciones de los elementos que forman el hormigón para realizar mezclas óptimas que garanticen propiedades mecánicas y físicas propias de un hormigón estructural. En este caso, se deben tener en cuenta las dosificaciones exactas para cada uno de los tipos de hormigón que se fabrican.

Inicialmente, las mezclas se han realizado para una cantidad de 1 m^3 , como es habitual en las amasadas de hormigón. Es una medida estandarizada a partir de la cual se establecen las proporciones (Tabla 13). A partir de esta dosificación, se calcula el volumen de las amasadas a estudiar según el volumen de hormigón que se utiliza en los ensayos. A continuación, se describe el volumen necesario de las amasadas según las necesidades de cada ensayo.

- Ensayo de asentamiento. Es necesario realizar dos ensayos por lo que el volumen de hormigón es dos veces el cono de Abrams. En este caso, 12 l (6 l cada cono).
- Ensayo de resistencia a compresión. En este ensayo se requieren 6 probetas cúbicas de 1 l cada una. Las tres primeras probetas son las que se rompen a los 7 días de curación, mientras que las tres restantes se rompen a los 28 días. Es decir, se requiere un volumen de 6 l.
- Ensayo de resistencia a tracción indirecta. En este caso, son necesarias dos probetas cilíndricas. El volumen de cada cilindro es de 5,3 l, por lo que en total se requieren 10,6 l de hormigón para este ensayo.

Todas estas probetas y conos hacen un total de 28,6 l. Este es el volumen de amasadas que se debe fabricar, pero es muy probable que durante los ensayos haya pérdidas, se derrame hormigón y, en definitiva, el hormigón fabricado no llegue para completar y rellenar todos los moldes mencionados. Por eso, este volumen se multiplica por un coeficiente de seguridad, en este caso de 1,2, para asegurar la existencia suficiente de hormigón en todas las amasadas. Finalmente, el volumen de hormigón a fabricar es de 35 l por amasada.

Cabe destacar que el cemento utilizado durante todo el estudio es el CEM II/B-L 32,5 N, de Élitecementos, el cual aporta las propiedades y características suficientes como para extraer conclusiones claras y válidas.

Respecto al agua, esta será extraída de la red de suministro del taller donde se realizan las amasadas y los posteriores ensayos, para poder extrapolar los resultados a posteriores aplicaciones en obra. A continuación, se exponen todos los parámetros relacionados con el agua necesarios para comprender las dosificaciones.

- Relación agua/cemento (A/C). Es la relación entre la masa de cemento y el volumen de agua que añadir a la amasada. Para todo los tipos de hormigón esta relación es de 0,44.
- Agua efectiva. Es el agua que se extrae de la relación anterior y que corresponde con la exigida por el cemento para realizar la reacción.
- Agua de absorción. Es el agua absorbida por lo áridos y que, por lo tanto, no reacciona para fabricar hormigón.
- Agua total. Es la suma del agua efectiva y del agua de absorción, es decir, el agua justa que necesitaría el hormigón en condiciones ideales.
- Agua humedad. Es el agua que contienen los áridos por su naturaleza y condiciones en las que han sido almacenados.
- Agua amasada. Es el agua total mencionada anteriormente restando el agua que supone la humedad del árido. Finalmente, es el valor de agua que debe ser introducido en la amasadora para conseguir una amasada en dosificaciones perfectas.

Tabla 13. Dosificaciones de los distintos tipos de hormigón para un volumen de 1 m³.

| Dosificaciones de las amasadas de hormigón (1 m ³) | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | AP20 | AP50 | AP100 | GP20 | GP50 | GP100 | REF |
| Cemento (kg) | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 |
| Arena caliza (kg) | 520,8 | 325,5 | 0 | 651 | 651 | 651 | 651 |
| Arena porcelánica (kg) | 110,91 | 277,28 | 554,56 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Grava caliza (kg) | 1082 | 1082 | 1082 | 865,6 | 541 | 0 | 1082 |
| Grava porcelánica (kg) | 0 | 0 | 0 | 184,34 | 460,85 | 921,70 | 0 |
| Agua efectiva (l) | 185 | 185 | 185 | 185 | 185 | 185 | 185 |
| Agua de absorción (l) | 27,58 | 30,96 | 36,59 | 24,10 | 22,26 | 19,19 | 25,33 |
| Agua total (l) | 212,58 | 215,96 | 221,59 | 209,10 | 207,26 | 204,19 | 210,33 |
| Agua humedad (l) | 1,44 | 3,60 | 7,21 | 0,37 | 0,92 | 1,84 | 0,00 |
| Agua amasada (l) | 211,14 | 212,35 | 214,38 | 208,73 | 206,34 | 202,35 | 210,33 |
| Fluidificante (kg) | 2,89 | 2,89 | 2,89 | 2,89 | 2,89 | 2,89 | 2,89 |

Conociendo el valor del volumen a amasar, ya es posible realizar las conversiones y calcular las cantidades de cada material para fabricar correctamente todas las amasadas previstas (Tabla 14).

Tabla 14. Dosificaciones de los distintos tipos de hormigón para un volumen de 35L.

| Dosificaciones de las amasadas de hormigón (35 L) | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | AP20 | AP50 | AP100 | GP20 | GP50 | GP100 | REF |
| Cemento (kg) | 14,88 | 14,88 | 14,88 | 14,88 | 14,88 | 14,88 | 14,88 |
| Arena caliza (kg) | 18,23 | 11,39 | 0 | 22,79 | 22,79 | 22,79 | 22,79 |
| Arena porcelánica (kg) | 3,88 | 9,70 | 19,41 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Grava caliza (kg) | 37,87 | 37,87 | 37,87 | 30,296 | 18,935 | 0 | 37,87 |
| Grava porcelánica (kg) | 0 | 0 | 0 | 6,45 | 16,13 | 32,26 | 0 |
| Agua amasada (l) | 7,39 | 7,43 | 7,50 | 7,31 | 7,22 | 7,08 | 7,36 |
| Fluidificante (g) | 101,15 | 101,15 | 101,15 | 101,15 | 101,15 | 101,15 | 101,15 |

3.1.2.2.2. Procedimiento de fabricación

El procedimiento de fabricación del hormigón se ha llevado a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Introducción de los áridos en la amasadora. Se empieza vertiendo los áridos más finos seguido de los áridos inmediatamente más gruesos para favorecer el mezclado de todos los áridos de forma uniforme (Figura 28).



Figura 28. Izquierda: vertido de arena. Derecha: vertido de grava porcelánica.

- Amasado de los áridos durante 2-3 minutos aproximadamente hasta la homogeneización de la mezcla.
- Introducción del cemento en la amasadora (Figura 29).



Figura 29. Izquierda: vertido de cemento. Derecha: cemento utilizado: CEM II/B-L 32,5 N de Élitecementos.

- d. Amasado de la mezcla junto con el cemento hasta obtener un aspecto homogéneo durante 1-2 minutos aproximadamente.
- e. Introducción del agua en la amasadora. Se vierte de forma continua y lenta para favorecer la homogeneización mientras la amasadora sigue girando. El tiempo total de vertido es de 1,5-2 minutos aproximadamente. Para controlar los tiempos de amasado se prepara un cronómetro, que es puesto en marcha en el momento en el que el agua entra en contacto por primera vez con la mezcla de áridos y cemento (Figura 30).



Figura 30. Vertido de agua.

- f. Amasado de la mezcla de agua, áridos y cemento. Se amasa durante 3-4 minutos aproximadamente para conseguir una perfecta homogeneización (Figura 31).



Figura 31. Mezcla de arena, grava, cemento y agua sin fluidificante.

- g. Introducción del aditivo fluidificante. Se añade el aditivo *Powerflow 3200* de *MC Bauchemie* de forma continua y lenta, durando aproximadamente el vertido 1 minuto (Figura 32).



Figura 32. Vertido de fluidificante.

- h. Amasado de la mezcla de áridos, cemento, agua y aditivo. Se deja la mezcla durante 3-4 minutos hasta que el aditivo haya logrado fluidificar la mezcla (Figura 33).



Figura 33. Mezcla de arena, grava, cemento y agua con fluidificante.

- i. Primer ensayo de asentamiento. Se realiza una vez pasados los primeros 10 minutos desde que el cronómetro empezó a medir, siguiendo la Norma UNE-EN 12350-2. Sirve para conocer la consistencia y fluidez del hormigón en los primeros momentos del amasado (Figura 34 y Figura 35).



Figura 34. Hormigón previo a realizar el primer ensayo de asentamiento.



Figura 35. Primer ensayo de asentamiento.

- j. Rellenado de moldes. Se aprovecha este mismo instante para obtener las probetas sobre las que se realizarán los ensayos de resistencia. Se obtienen un total de 6 cubos y 3 cilindros. Estos moldes han sido pintados previamente con desencofrante, con el objetivo de facilitar la extracción de las probetas. Todo ello ha sido realizado siguiendo el procedimiento y las pautas recogidas en la Norma UNE-EN 12390-2. Los moldes vacíos se muestran en la Figura 38 y el relleno y compactado, en la Figura 35 y Figura 36.



Figura 36. Rellenado de moldes y picado de probetas.



Figura 37. Moldes rellenos. Izquierda: detalle de aire retenido en el interior de uno de los moldes cilíndricos. Cabe recalcar la importancia de imprimir golpes suaves a los moldes para que expulsen el aire. Derecha: partida de moldes de una amasada (3 probetas cilíndricas y 6 cúbicas).



Figura 38. Moldes preparados y bañados en desencofrante (paleta y brocha) para tres amasadas diferentes.

- k. Amasado de la mezcla restante. Se vuelve a amasar el hormigón restante durante unos 20 minutos, hasta llegar al minuto 30 desde que empezó a contar el cronómetro.
- l. Segundo ensayo de asentamiento. Al igual que antes, se conoce la consistencia y fluidez del hormigón en el momento último del amasado, para conocer la evolución del hormigón en el tiempo. Se realiza siguiendo la Norma UNE-EN 12350-2.

A partir de aquí, es de real importancia el tratamiento y el control del fraguado. Es por eso que, tras el vertido del hormigón fresco en los moldes, estos son cubiertos por una lona con el objetivo de que el agua que contiene el hormigón no se evapore y se garantice un buen curado. Pasado un día, cuando el hormigón ya es sólido, se desencofran las probetas y se trasladan (Figura 39) a una cámara con humedad y temperatura controladas (Figura 40). La temperatura de control del fraguado y la humedad son, respectivamente de 20°C y 100%.



Figura 39. Transporte de las probetas del hormigón AP20 y AP50 a la cámara humidificadora.



Figura 40. Depósito de las probetas del hormigón AP20 y AP50 en el interior de la cámara humidificadora.

3.1.3. Ensayo de asentamiento

El objetivo principal del ensayo de asentamiento es determinar la consistencia del hormigón fresco. Es imprescindible disponer de los equipos necesarios para realizar el ensayo. Se realiza siguiendo el procedimiento de la Norma UNE-EN 12350-2.

Primeramente, se debe disponer una placa metálica sobre una superficie plana y colocar el cono hueco contra la placa. Una vez esté todo preparado, se aprieta el cono contra la placa con los pies para evitar fugas entre estas dos piezas y se empieza el vertido de hormigón. Este se realiza

en tres fases, cada una de ellas cubriendo un tercio de la altura total del cono. Al terminar cada uno de los tres vertidos se compacta el hormigón con 25 golpes con la barra de compactación. Hay que tener en cuenta que a la hora de compactar las dos capas superiores no se debe sobrepasar a la capa inmediatamente inferior, de forma que cada capa reciba un total de 25 golpes cada una. Una vez se rellena el cono por completo, si falta hormigón, se añade el necesario hasta llenarse y, posteriormente, se enrasa con la ayuda de la barra de compactación (Figura 42).

A partir de aquí, se limpia el hormigón que haya sido desparramado por los laterales del cono y, en consecuencia, haya sido depositado en la placa metálica, para que no interfiera en el resultado. El levantamiento del cono se realiza de forma vertical, lenta y continua, entre 2 y 5 segundos, y se procede a la medida de la altura a la que se ha quedado el cono de hormigón fresco. La medida del asentamiento se realiza midiendo la distancia entre la altura del cono hueco y el punto más alto de la masa de hormigón asentada.

Para una misma amasada se realizan dos ensayos, uno a los 10 minutos de haber empezado a contar el tiempo desde el vertido del agua y otro al finalizar el amasado, a unos 30 minutos aproximados de haber empezado a contar (Figura 41). Esto otorga al ensayo un punto de vista evolutivo, donde se puede comparar y simular el hormigón nada más amasar, recién salido de la fábrica, y el hormigón que podría llegar a una obra en el momento del vertido.



Figura 41. Segundo ensayo de asentamiento.



Figura 42. Procedimiento del ensayo de asentamiento. Sujeción del cono sobre bandeja metálica mientras se introduce el hormigón y se pica con la barra de compactación.

Según el Código Estructural la docilidad del material será la necesaria para que pueda ser vertido fácilmente, que su fluidez permita envolver la armadura y que no queden espacios sin rellenar dentro de los encofrados. A parte, no debe ser muy fluido para evitar problemas de segregación. Es por eso que existe una clasificación (Tabla 15) para conocer la docilidad del hormigón y así poder clasificar cada tipo de hormigón según el resultado del ensayo de asentamiento.

Tabla 15. Clases de consistencia.

| Tipo de consistencia | Asentamiento (mm) |
|----------------------|-------------------|
| Seca (S) | 0-20 |
| Plástica (P) | 30-40 |
| Blanda (B) | 50-90 |
| Fluida (F) | 100-150 |
| Líquida (L) | 160-210 |

Según la normativa, salvo justificación específica en aplicaciones que así lo requieran, no se empleará las consistencias seca y plástica. Además, no podrá emplearse la consistencia líquida, salvo que se consiga mediante el empleo de aditivos superplastificantes. En obras de edificación, para pilares, forjados y vigas se utilizará un hormigón de consistencia fluida salvo justificación en contra.

3.1.4. Ensayo de hormigón endurecido – Resistencia a compresión

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a compresión de probetas de ensayo de hormigón endurecido. En este estudio, se realizan dos tipos de ensayo dependiendo del número de días que han pasado desde el amasado del hormigón hasta la rotura de las probetas. El primero se realiza pasados los 7 días y el segundo, pasado los 30 días. La norma a tener en cuenta durante el ensayo es la Norma UNE-EN 12390-3.

Primero de todo, las probetas a estudiar corresponden a un cubo de 100 mm de lado. Estas probetas son introducidas entre los platos de la máquina, previamente limpiados de escombros o gravilla, alineándolas de forma correcta dentro de las marcas del plato inferior. Las superficies de las probetas deben estar exentas de exceso de humedad y su colocación sobre los platos debe ser tal que la carga aplicada sea perpendicular a la dirección de hormigonado.

En cuanto a los parámetros introducidos en el sistema, se debe tener en cuenta que la velocidad de carga constante debe estar dentro del rango de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. En este caso, el sistema requiere un valor en kN/s y, para conseguir la conversión a estas unidades, se utiliza la superficie transversal de la probeta (100x100 mm). El valor obtenido es de 6 kN/s con una precarga que no excede el 30% de la carga de rotura, de 2 kN (Figura 43).

El ajuste de la máquina se realiza en un primer momento manualmente hasta que el plato superior esté prácticamente en contacto con la probeta (Figura 44). El encargado de realizar el movimiento para comprimir el hormigón es el plato inferior, a la velocidad mencionada anteriormente. La señal de arranque efectúa el movimiento del plato inferior que, tras aplicar la precarga, procede a realizar el ensayo. Una vez rota la probeta (Figura 45), se registra la resistencia obtenida como resultado del ensayo.

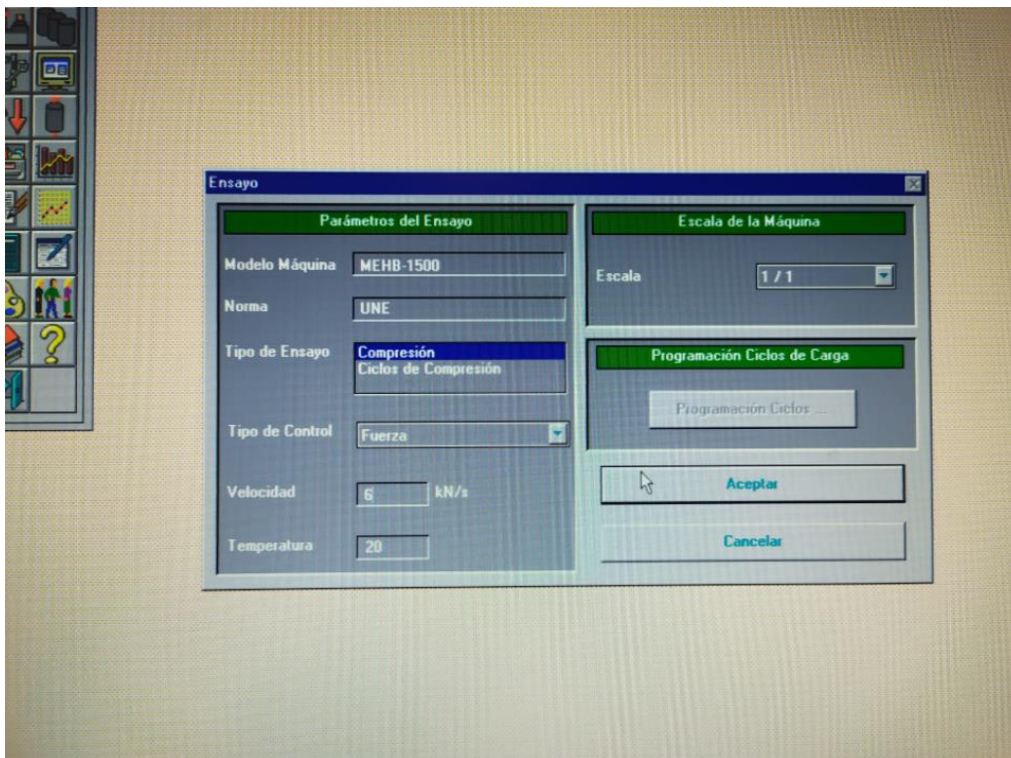


Figura 43. Parámetros de la máquina de ensayo.

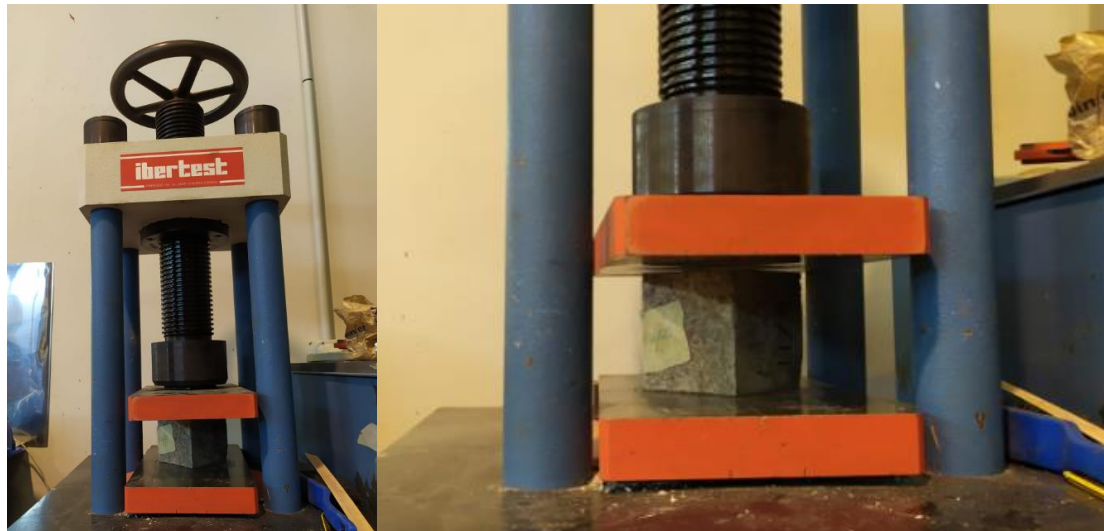


Figura 44. Izquierda: ajuste de los platos de la máquina de ensayo sobre la probeta cúbica. Derecha: colocación de la probeta previa a ensayo.



Figura 45. Probeta tras ensayo. Se observa el desprendimiento de las paredes laterales de la probeta cúbica propias de un ensayo correctamente realizado.

3.1.5. Ensayo de hormigón endurecido – Tracción indirecta

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a tracción indirecta, en este caso, sobre probetas cilíndricas de hormigón endurecido de 300 mm de longitud y 150 mm de diámetro. Este ensayo se realiza aplicando una fuerza de compresión sobre una banda estrecha en toda la longitud del cilindro, simulando así una rotura de la probeta a tracción.

Para realizar este ensayo se requiere una máquina de ensayo de compresión, junto con un sistema que regule las condiciones del ensayo y las bandas de apoyo de acuerdo con la Norma EN 316.

Respecto a la probeta, esta debe ser cilíndrica, de acuerdo con las especificaciones de la Norma EN 12390-1. Para realizar el ensayo la probeta debe ser marcada con dos líneas a lo largo de su longitud de forma que sean opuestas según un plano axial. Estas líneas deben ser unidas en las dos caras del cilindro para definir claramente el plano sobre el que se aplicará la carga de compresión. A la hora de colocarlas en posición de ensayo (Figura 46 y Figura 47), se debe remover el exceso de humedad, así como las impurezas de la superficie de las probetas, y limpiar la superficie de los platos de ensayo. La colocación en los platos de ensayo debe ser centrada, situando las bandas de apoyo de forma cuidadosa sobre la superficie de ensayo.

Respecto a los parámetros del ensayo, la velocidad de carga seleccionada debe permanecer dentro del rango establecido por la norma, entre 0,04 y 0,06 MPa/s. Es por eso que el valor seleccionado es de 0,05 MPa/s.



Figura 46. Colocación de los platos sobre el sistema de ensayo de tracción indirecta.

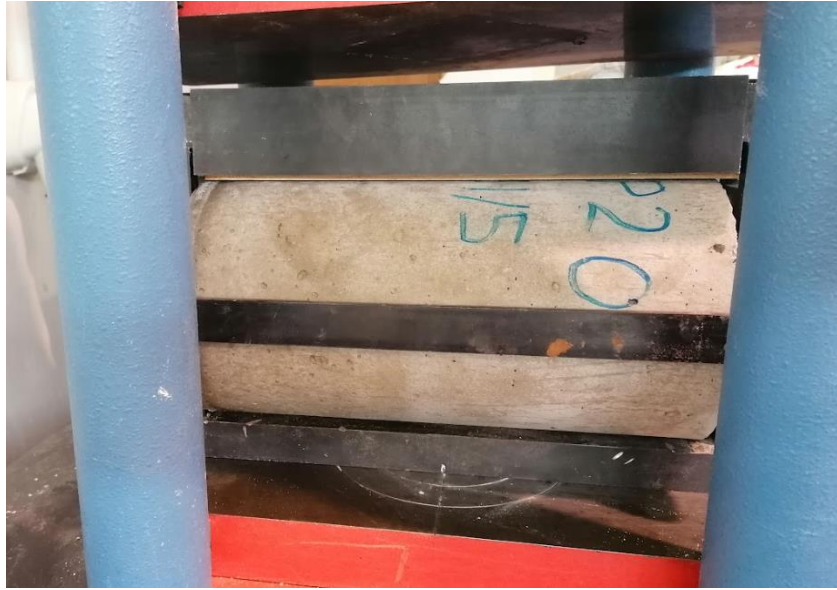


Figura 47. Ajuste y colocación de la probeta en la zona centro de la máquina de ensayo.

3.2. Metodología experimental para el estudio de la aplicación como hormigón expuesto a altas temperaturas

El estudio que se realiza sobre el hormigón expuesto a altas temperaturas consiste en aplicar sobre probetas cúbicas de hormigón, distintas temperaturas y realizar un ensayo de resistencia a compresión para observar el comportamiento del hormigón tras ser extraído del horno.

Las distintas temperaturas a las que va a estar expuesto el hormigón son 200, 400, 600 y 800°C (Figura 48). Al realizar estos 4 ensayos se pretende comprobar la evolución de la resistencia a compresión del hormigón porcelánico reciclado a medida que la temperatura de exposición aumenta, partiendo siempre del ensayo de resistencia a compresión de la probeta a temperatura ambiente, 20°C.

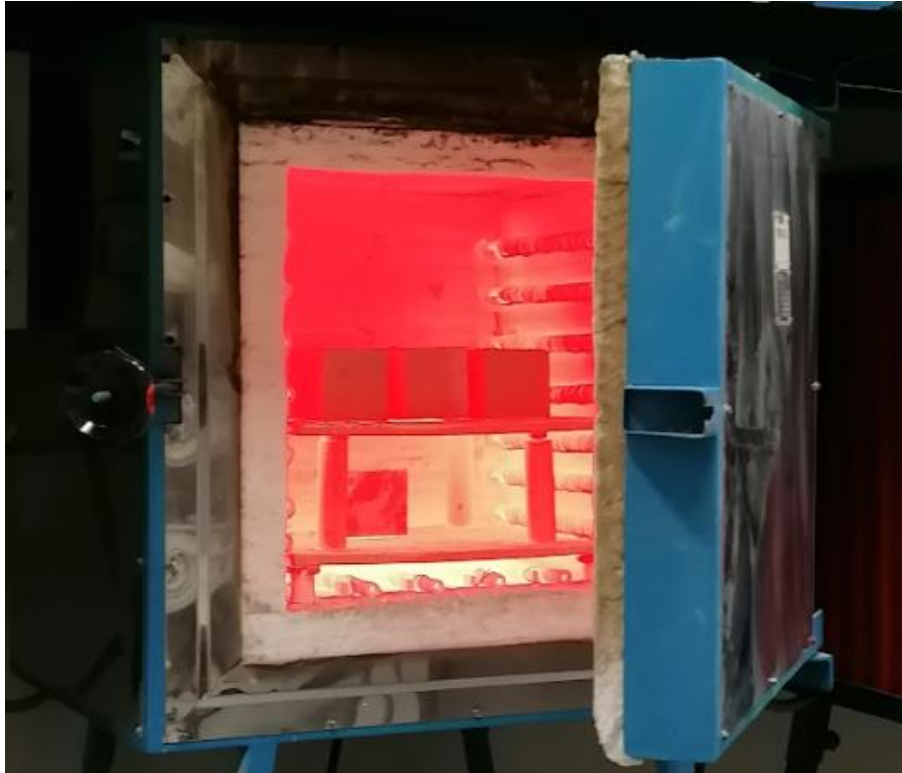


Figura 48. Probetas a 800°C antes de ser retiradas del horno para proceder a su ensayo de resistencia a compresión.

Las probetas son cúbicas y de las mismas dimensiones que las empleadas en el ensayo de resistencia, de 100 mm de lado. Para este ensayo se han fabricado más probetas a parte de las mencionadas en apartados anteriores. Esto implica nuevas amasadas cuyas dosificaciones son exactamente iguales a las realizadas previamente. A la hora de controlar tanto la temperatura de la superficie como del interior de las probetas, se ha introducido durante una amasada un sensor en el interior de una de las probetas y se ha instalado otro en el interior del horno, pegado a la superficie de la probeta de prueba. Confeccionando esta probeta experimental y que servirá para todas las horneadas, se obtiene información tanto de la superficie como del interior de las probetas.

En el momento en el que el interior de las probetas adquiere la temperatura deseada dependiendo de la temperatura a la que se quiere realizar el ensayo, se extrae del horno y se traslada a la máquina de ensayo. Esta manipulación se realiza mediante equipos de protección como guantes, para las temperaturas más bajas, y con guantes, delantal y careta, todo fabricado con kevlar aluminizado para las temperaturas más agresivas, con el objetivo de prevenir cualquier accidente por el contacto o la radiación de las probetas.

El planteamiento de este ensayo consiste en realizar, sobre los hormigones con porcentajes de sustitución más agresivos, el ensayo de resistencia a compresión estando las probetas aún a la temperatura de 200, 400, 600 u 800°C, según corresponda. Hay tres probetas cúbicas de cada tipo de hormigón con el objetivo de obtener resultados representativos. Los tipos de hormigón estudiados son: REF, AP50, AP100, GP50, GP100. Se introduce el hormigón convencional para comparar respecto a una base.

Obtenidos los valores de resistencia a compresión, el próximo paso es obtener los valores del coeficiente de reducción de resistencia, estableciendo los 20°C de temperatura ambiente como referencia. A partir de este cálculo se ven las diferencias principales entre los distintos tipos de hormigón y las temperaturas empleadas en el ensayo. Además, es posible comparar dichos valores con los establecidos en la norma.

Cabe destacar que el Eurocódigo 2, en su versión antigua (1994) y en la actual (2004) recoge los valores de los coeficiente de reducción de resistencia. En la versión actual, que data de 2004, se distingue el tipo de árido utilizado en el hormigón, supuestamente porque dependiendo del tipo de árido utilizado en la fabricación estos valores aumentan o disminuyen. A continuación, en la Tabla 16, se muestran dichos valores para las dos versiones del Eurocódigo 2 mencionadas.

Tabla 16. Valores del coeficiente de reducción de resistencia para las temperaturas de 20, 200, 400, 600 y 800 °C, según el Eurocódigo 2, en su versión de 1994 y 2004.

| T (°C) | EC2 (1994) | EC2 (2004) Calcárea | EC2 (2004) Sílice |
|---------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| 20 | 1 | 1 | 1 |
| 200 | 0,93 | 0,97 | 0,95 |
| 400 | 0,8 | 0,85 | 0,75 |
| 600 | 0,48 | 0,6 | 0,45 |
| 800 | 0,16 | 0,27 | 0,15 |

Esta distinción entre un tipo de árido y otro en los efectos que provoca sobre la reducción de resistencia a altas temperaturas, abre las puertas a otros tipos de árido para ser estudiados y observar el comportamiento del hormigón en estos ambientes tan agresivos. Es la oportunidad perfecta para realizar el seguimiento del árido porcelánico como agregado del hormigón a testear. En este caso, el árido porcelánico es un material que ha sido cocido en alguna etapa de su ciclo de vida, por lo que se presupone su estabilidad y buen comportamiento ante exposiciones a ambientes con altas temperaturas. No obstante, es necesario observar su comportamiento junto con los demás elementos que forman el hormigón para conocer realmente las capacidades de este tipo de hormigón reciclado.

Además de la resistencia de las probetas, también se pretende conocer la deformación que sufren durante el ensayo previa al fallo. Este procedimiento de medida se realiza con un reloj comparador (Figura 49). Este se coloca fijo sobre un soporte que es adherido al plato móvil de la máquina de ensayo, por lo que la medida realizada será el desplazamiento ascendente del plato desde que se comienza a aplicar fuerza de compresión sobre la probeta cúbica hasta que el ensayo haya terminado.

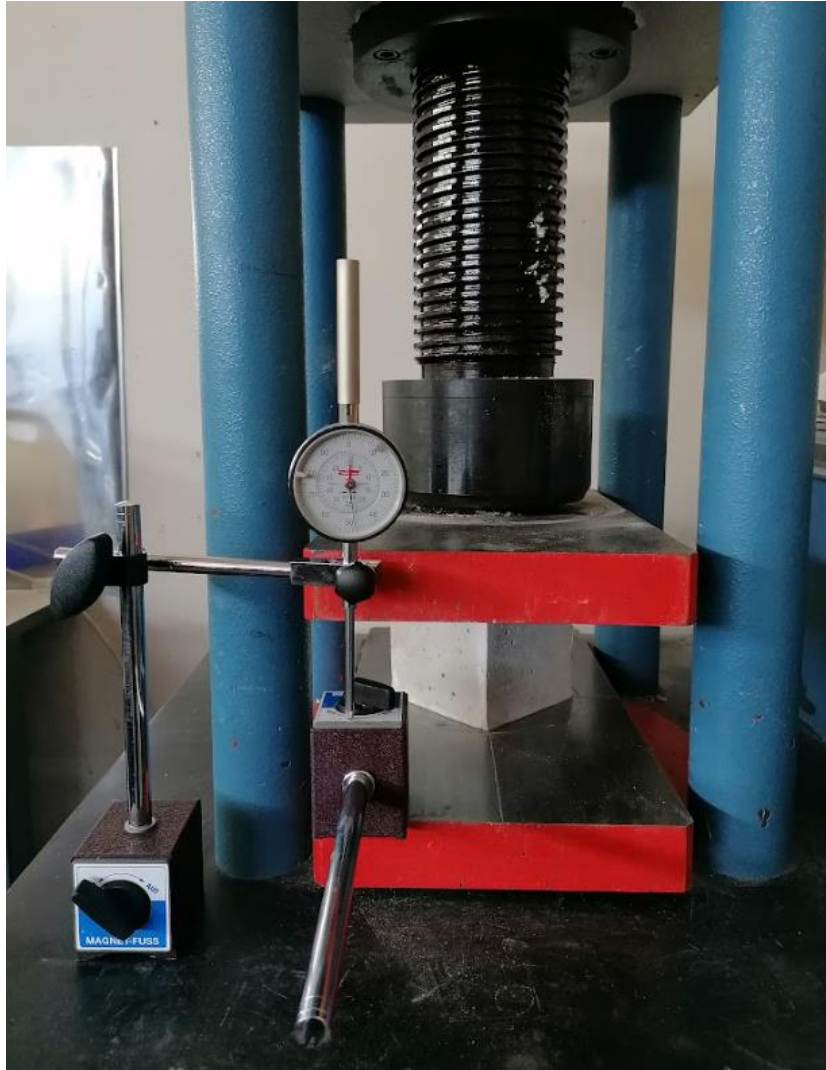


Figura 49. Montaje del reloj comparador para medir la deformación de la probeta cúbica durante el ensayo a altas temperaturas.

Esta medida de deformación es necesaria para conocer el comportamiento en cuanto a deformaciones del hormigón mientras está expuesto a altas temperaturas. También se pretende conocer la evolución que este va sufriendo a medida que la temperatura aumenta.

4. Resultados

En los siguientes apartados se muestran los resultados de los ensayos realizados durante este estudio, así como los cálculos empleados para obtener todos los valores de los distintos tipos de hormigón estudiados (Figura 50, Figura 51 y Figura 52).

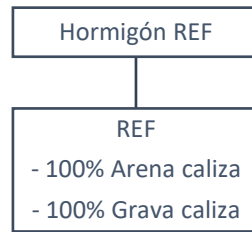


Figura 50. Composición del hormigón REF.

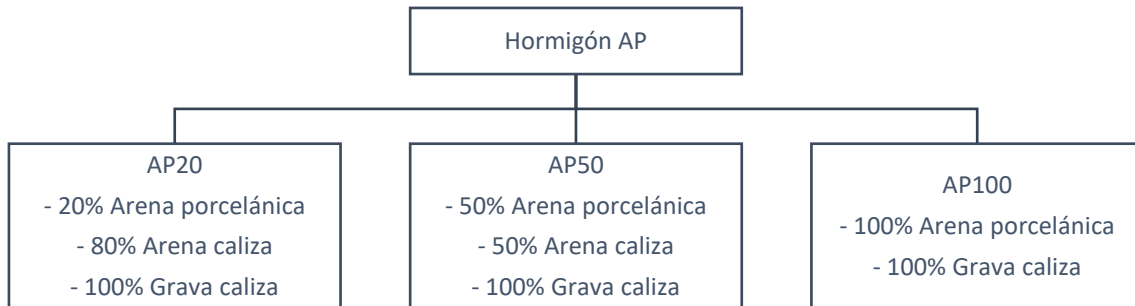


Figura 51. Composición del hormigón AP20, AP50 y AP100.

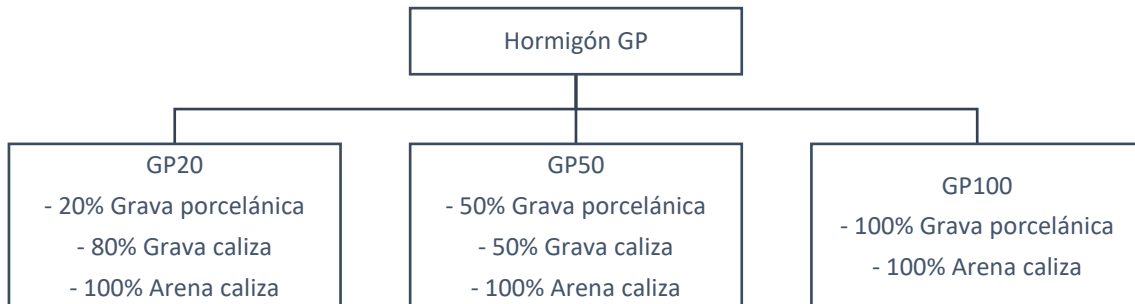


Figura 52. Composición del hormigón GP20, GP50 y GP100.

4.1. Ensayo de asentamiento

4.1.1. Resultados del ensayo de asentamiento

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, los resultados de este ensayo se dividen según el tiempo que el hormigón ha estado amasándose. El primer ensayo se realiza a los 10 minutos de verter el agua y el segundo a los 30 minutos. Los resultados mostrados corresponden

a todos los tipos de hormigón que se han expuesto y que a continuación se muestran (Tabla 17). Los valores se refieren a la distancia medida entre la altura del cono hueco y el punto más alto de la masa de hormigón asentada, ayudándose con la barra de compactación, tal y como se muestra en las imágenes mostradas tras los resultados.

Tabla 17. Resultados del ensayo de asentamiento.

| Serie | Ensayo 1 (cm) [10'] | Ensayo 2 (cm) [30'] |
|-------|---------------------|---------------------|
| AP20 | 14,5 | 10,5 |
| AP50 | 18,5 | 11 |
| AP100 | 9 | 10,5 |
| GP20 | 17,5 | 12,5 |
| GP50 | 19 | 14 |
| GP100 | 23 | 17 |
| REF | 18 | 7 |

Para visualizar mejor los resultados y compararlos entre sí, se ha confeccionado un gráfico (Figura 53) en el que también se muestran los rangos de consistencia aceptados en este estudio. Se acepta la consistencia fluida, ya que es la permitida por el Código Estructural, y también la consistencia líquida en el caso en el que se utilice un aditivo superplastificante, es decir, este estudio.

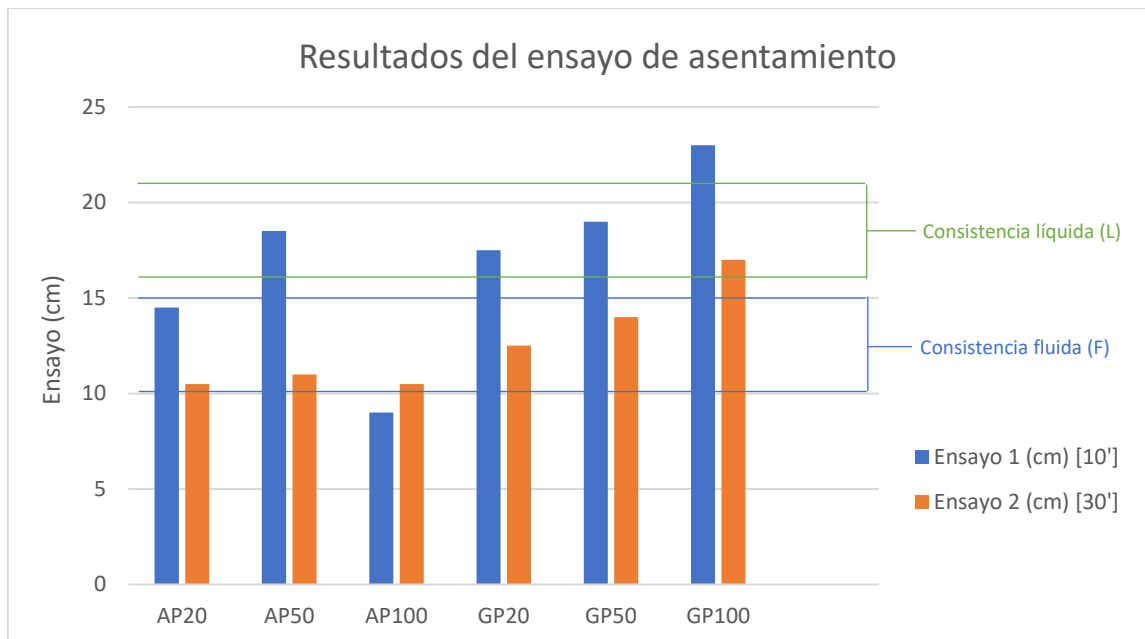


Figura 53. Resultados del ensayo de asentamiento.

También se ofrecen imágenes de todos los ensayos realizados sobre los distintos tipos de hormigón. En la Figura 54 se muestran los ensayos del hormigón AP20. El primero se ha desmoronado ligeramente, pero se coloca bien. El segundo tiene mayor compactación, sin desmoronamiento y, en general, buen aspecto.



Figura 54. AP20. Izquierda: Ensayo a los 10 min. Derecha: Ensayo a los 30 min.

En la Figura 55 se muestran los ensayos del hormigón AP50. El primer ensayo tiene mayor fluidez inicial y el cono, en consecuencia, se desmorona. El segundo tiene una buena recuperación de compactación y homogeneidad.



Figura 55. AP50. Izquierda: Ensayo a los 10 min. Derecha: Ensayo a los 30 min.

En la Figura 56 se muestran los ensayos del hormigón AP100. En el primer ensayo existe desmoronamiento y una ligera segregación. Además, la forma en la que se ha desmoronada resulta peculiar. En el segundo ensayo ya no existe la misma fluidez inicial, se recupera la compactación y la homogeneidad y adquiere un buen aspecto.



Figura 56. AP100. Izquierda: Ensayo a los 10 min. Derecha: Ensayo a los 30 min.

En la Figura 57 se muestran los ensayos del hormigón GP20. En el primer ensayo existe desmoronamiento inicial debido a una mayor fluidez, pero no existe segregación. En el segundo, se aprecia un buen aspecto en cuanto a homogeneidad y compactación.



Figura 57. GP20. Izquierda: Ensayo a los 10 min. Derecha: Ensayo a los 30 min.

En la Figura 58 se muestran los ensayos del hormigón GP50. En el primer ensayo existe mucha fluidez y desmoronamiento del cono, pero aún no se aprecia una segregación muy notable. En el segundo ensayo el cono es más compacto, no existe segregación, pero el aspecto es más chafado que en los ensayos previos de otros hormigones.



Figura 58. GP50. Izquierda: Ensayo a los 10 min. Derecha: Ensayo a los 30 min.

En la Figura 59 se muestran los ensayos del hormigón GP100. En el primer ensayo existe mucha fluidez, segregación considerable y muy poca homogeneidad. En el segundo ensayo se recupera la homogeneidad sin existir segregación, pero, al igual que en el GP50 el cono tiene un aspecto chafado.



Figura 59. GP100. Izquierda: Ensayo a los 10 min. Derecha: Ensayo a los 30 min.

Y, por último, en la Figura 60 se muestran los ensayos del hormigón REF. En el primer ensayo existe homogeneidad, nada de segregación y una fluidez estándar. En el segundo ensayo, el aspecto del cono es muy bueno, con compactación y homogeneidad destacables.



Figura 60. REF. Izquierda: Ensayo a los 10 min. Derecha: Ensayo a los 30 min.

4.1.2. Conclusiones del ensayo de asentamiento

Se observa en todos los tipos de hormigón que, en el segundo ensayo, realizado 20 minutos tras el primero, existe una mayor consistencia. Esto se debe a que inicialmente el hormigón no ha sufrido prácticamente la reacción de fraguado y es por lo que su aspecto es más fluido, llegando incluso en algunos casos a desmoronarse por completo. En cambio, en el segundo ensayo, el fraguado del hormigón es más notable y la forma de la masa de hormigón en todos los casos es más compacta. Existe la excepción del hormigón AP100, cuyo segundo ensayo resulta en una bajada de la consistencia. Observando la Figura 56 se extrae la conclusión de que esta discrepancia con el resto de hormigones se debe a la forma peculiar en la que el cono se ha desmoronado, pero el resultado del segundo ensayo se observa más consistente a simple vista, aunque los resultados del ensayo muestren lo contrario.

También se observa como en los primeros ensayos del hormigón AP50, AP100, GP50 y GP100 existe segregación y falta de homogeneidad. Se observa, por ejemplo, en el GP100 como el amasado no es homogéneo, existe mucha fluidez, mucha segregación y todo debido a que el árido grueso es 100% grava porcelánica (Figura 61). Esto es debido a que el árido porcelánico tiene una absorción de agua menor que la del árido convencional. Al no absorber tanto agua, esta se encuentra en el hormigón dando el aspecto de fluidez y provocando en ciertos casos la segregación de los áridos. Este problema se resuelve en el segundo ensayo para todos los casos ya que, como se ha comentado antes, el fraguado del hormigón está mucho más avanzado y existe una mayor homogeneidad y compactación, dando buenos resultados en este segundo ensayo de asentamiento.



Figura 61. Segregación del hormigón GP100.

Respecto a los valores permitidos de consistencia por el Código Estructural, se afirma que los resultados obtenidos están generalmente dentro de los márgenes establecidos. Tal y como se ha dicho previamente, aquellos hormigones en los que el árido es más complicado que absorba agua, existe una mayor fluidez, sobre todo en el primer ensayo. Pero esto se ve corregido para el segundo gracias a que la reacción del hormigón está mucho más avanzada.

4.2. Ensayo de hormigón endurecido – Resistencia a compresión

4.2.1. Resultados del ensayo de resistencia a compresión

Los resultados del ensayo a compresión son expuestos a continuación, teniendo cada uno de los tipos de hormigón tres valores de resistencia debido a los tres ensayos que se han realizado sobre tres probetas distintas de cada uno de ellos. También cabe destacar que este ensayo se realiza sobre probetas con 7 y 28 días de curación. En las gráficas se muestra el valor promedio resultante, así como la desviación existente entre estos tres valores mencionados. Los valores RC1, RC2 y RC3 se refieren a los valores de resistencia fruto del ensayo en la máquina de compresión.

A continuación, se muestra como ejemplo una imagen del software utilizado con los parámetros y resultados del ensayo (Figura 62). El valor superior (color amarillo) indica la fuerza realizada hasta el momento del fallo de la probeta y el valor inferior (también de color amarillo), el valor de la resistencia alcanzada por la probeta. También se observa la curva del ensayo, donde se aprecia la aproximación a la probeta (línea horizontal), la precarga (con mayor inclinación) y el

ensayo hasta romper (la línea diagonal con pendiente constante hasta su caída repentina (rotura)).

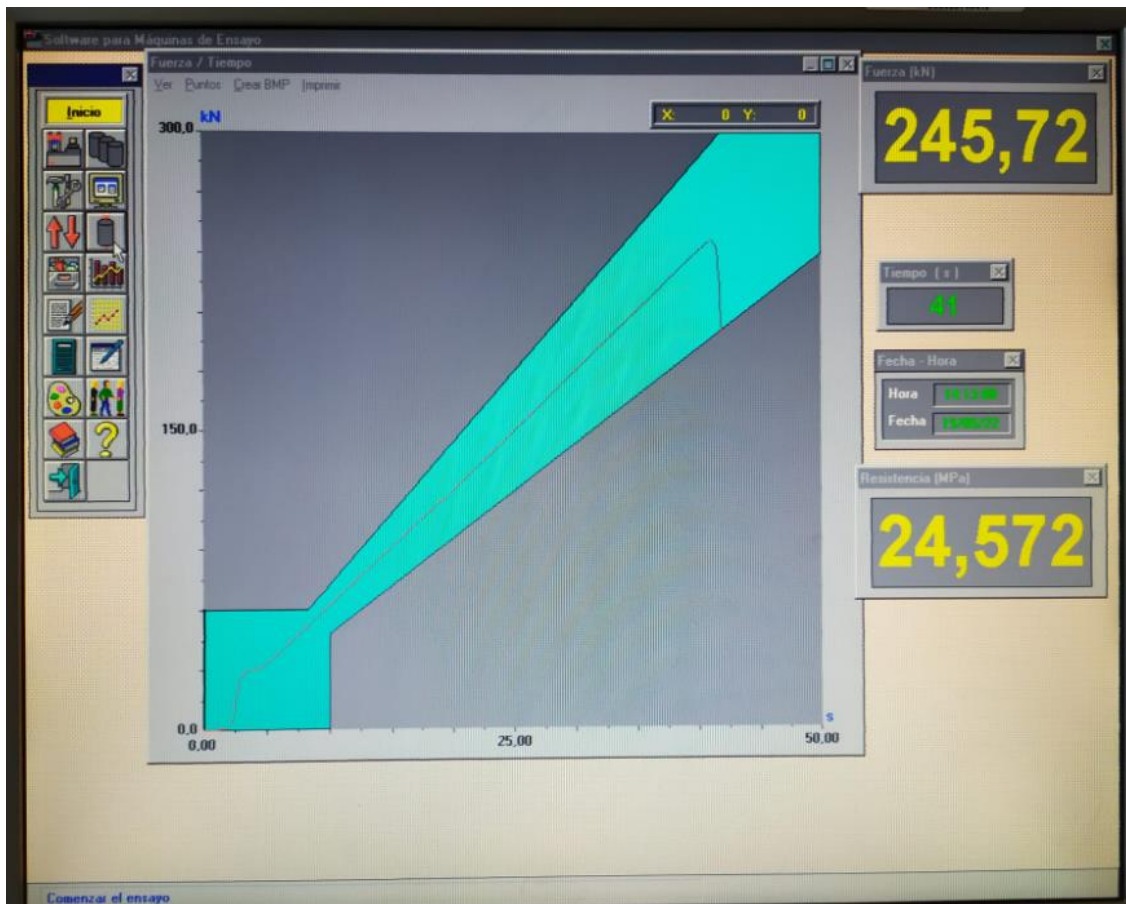


Figura 62. Software utilizado durante el ensayo de resistencia a compresión.

Los resultados del ensayo de compresión sobre las probetas con 7 y 28 días de curación se muestran en Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 18. Resultados del ensayo de compresión sobre probetas con 7 días de maduración.

| Ensayo sobre probetas con 7 días de curación | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|----------------|------------------|
| Serie | RC1 (MPa) | RC2 (MPa) | RC3 (MPa) | Promedio (MPa) | Desviación (MPa) |
| AP20 | 25,47 | 23,15 | 26,07 | 24,90 | 1,54 |
| AP50 | 27,31 | 26,29 | 26,44 | 26,68 | 0,55 |
| AP100 | 24,57 | 24,59 | 24,84 | 24,67 | 0,15 |
| GP20 | 28,97 | 29,18 | 29,07 | 29,07 | 0,11 |
| GP50 | 29,54 | 31,26 | 28,53 | 29,78 | 1,38 |
| GP100 | 32,79 | 33,54 | 30,30 | 32,21 | 1,70 |
| REF | 27,94 | 28,67 | 32,63 | 29,75 | 2,52 |

Tabla 19. Resultados del ensayo de compresión sobre probetas con 28 días de maduración.

| Ensayo sobre probetas con 28 días de curación | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|----------------|------------------|
| Serie | RC1 (MPa) | RC2 (MPa) | RC3 (MPa) | Promedio (MPa) | Desviación (MPa) |
| AP20 | 34,37 | 31,83 | 34,01 | 33,40 | 1,37 |
| AP50 | 35,31 | 34,91 | 34,55 | 34,92 | 0,38 |
| AP100 | 33,75 | 33,47 | 33,15 | 33,46 | 0,30 |
| GP20 | 33,93 | 35,43 | 35,60 | 34,99 | 0,92 |
| GP50 | 34,90 | 37,89 | 36,14 | 36,31 | 1,50 |
| GP100 | 37,28 | 39,02 | 40,98 | 39,09 | 1,85 |
| REF | 33,26 | 36,92 | 39,01 | 36,40 | 2,91 |

Para observar mejor los resultados obtenidos se han expresado los valores mostrados en las tablas previas en gráficos. La Figura 63 y la Figura 64 muestran estos resultados.

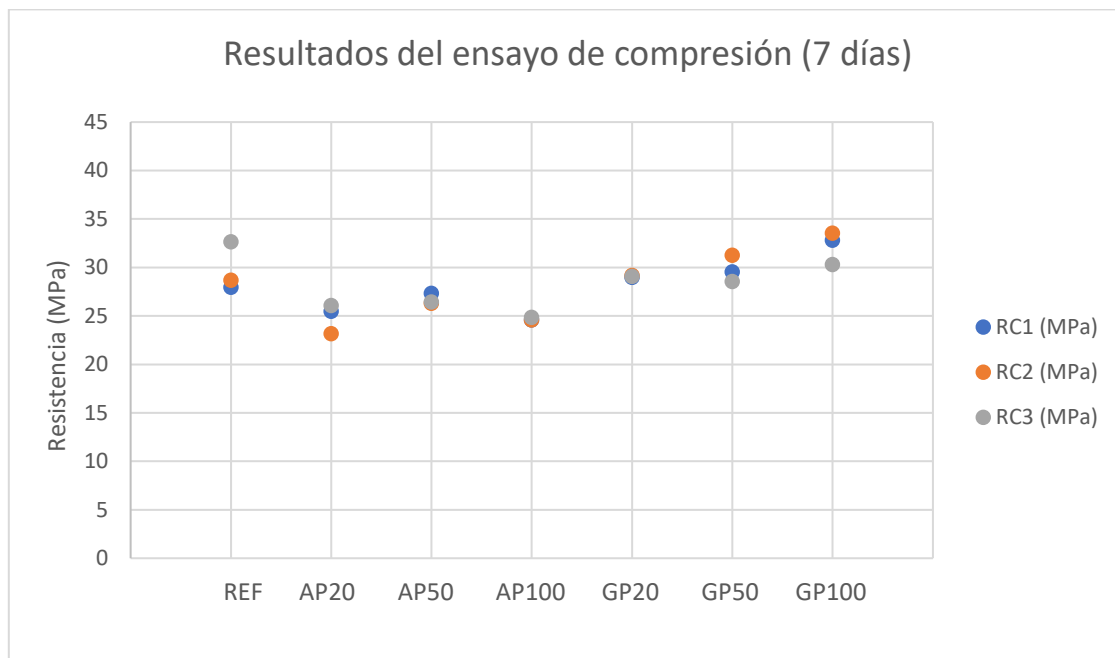


Figura 63. Resultados del ensayo de compresión sobre probetas con 7 días de maduración.

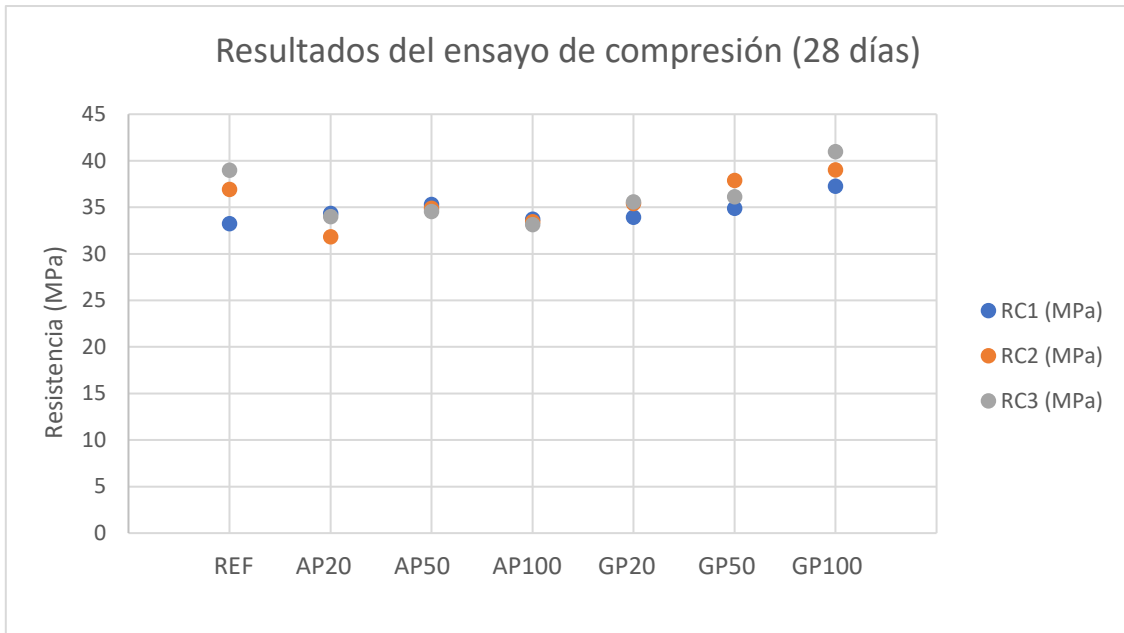


Figura 64. Resultados del ensayo de compresión sobre probetas con 28 días de maduración.

Con el objetivo de conocer la evolución en cuanto a resistencia a compresión de las probetas según el paso de los días, se ha realizado una comparativa entre la resistencia a 7 y 28 días, la cual se muestra en la Figura 65.

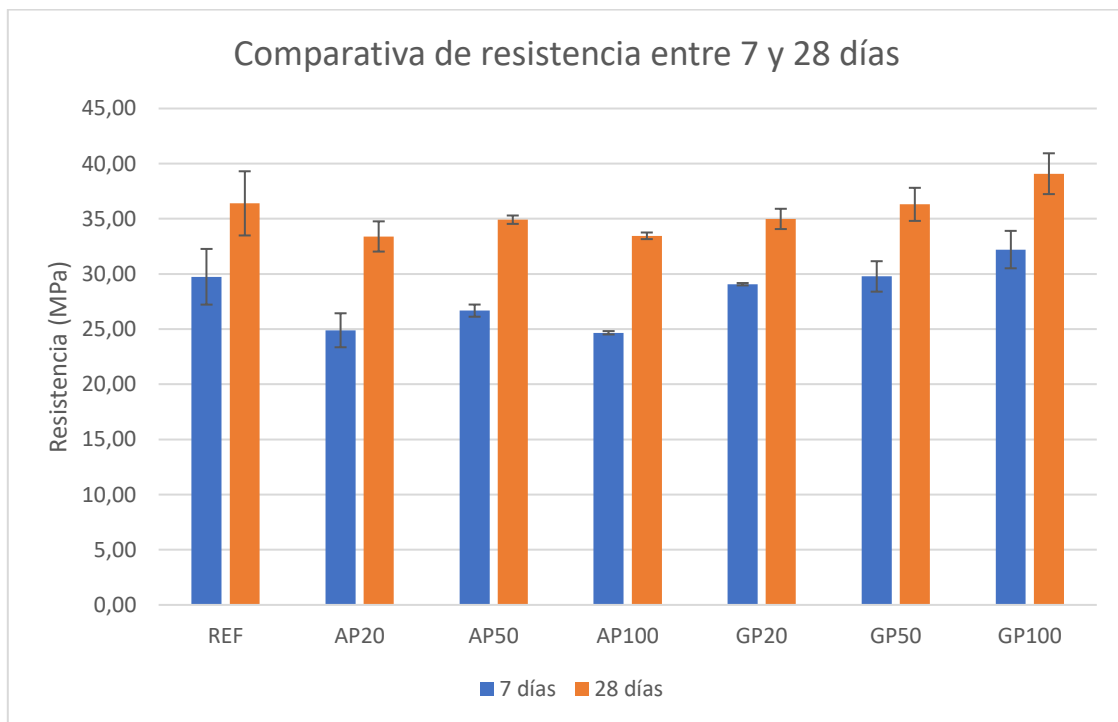


Figura 65. Comparativa entre el hormigón curado 7 y 28 días.

A continuación, se muestra una imagen que sirve como ejemplificación de lo que es una rotura de una probeta cúbica en el ensayo de resistencia a compresión (Figura 66). Se observa el tronco de la pieza y el trozo de material separado por efectos de la compresión entre los platos de la máquina de ensayo.



Figura 66. Rotura de una probeta cúbica GP20 en el ensayo de resistencia a compresión.

4.2.2. Conclusiones del ensayo de resistencia a compresión

Se observa cómo los valores de resistencia a compresión resultado del ensayo han sido todos representativos por la similitud entre los tres valores de las tres probetas distintas de cada tipo de hormigón y la barra de error representada en la Figura 65.

En este ensayo es destacable la resistencia obtenida por el hormigón GP100, el cual contiene un 100% de árido porcelánico reciclado como árido grueso. Es el hormigón que mejor resultado ha obtenido, tanto en las probetas curadas durante 7 días como en las de 28 días.

También se concluye que, a medida que aumenta el contenido de árido reciclado porcelánico, la resistencia a compresión del hormigón aumenta. Esto se observa mejor en el hormigón GP, donde el árido sustituido es el árido grueso.

En cambio, en el caso del hormigón AP, el cual contiene arena porcelánica reciclada en distintas proporciones, se observa cómo su resistencia a compresión es menor que la del hormigón referencia e incluso menor que la del resto de tipos de hormigón GP.

Aun así, no se puede afirmar que la resistencia del hormigón con árido reciclado porcelánico sea mayor que la del hormigón convencional. No obstante, sí que es esperanzador que los valores de resistencia sean tan semejantes los unos con los otros. Significa que el árido porcelánico, incluso en sustituciones del 100%, obtiene excelentes valores de resistencia a compresión, igualando a los hormigones convencionales.

En cuanto a las roturas de las probetas, la gran mayoría han sido de forma correcta, tal y como indica la Norma UNE-EN 12390-3 (Figura 67). En algunas ocasiones, la probeta se ha roto por un lateral, pero valorando la forma en la que la máquina termina el ensayo, se ha observado y determinado que la máquina de ensayo al romper la probeta se desvía ligeramente hacia la pared de la probeta cúbica que ha empezado a romper primero. Esto lo que provoca es más

compresión en esa zona y, en consecuencia, la rotura de la probeta exclusivamente por un lateral. Es por eso por lo que este tipo de rotura se ha dado por válida.

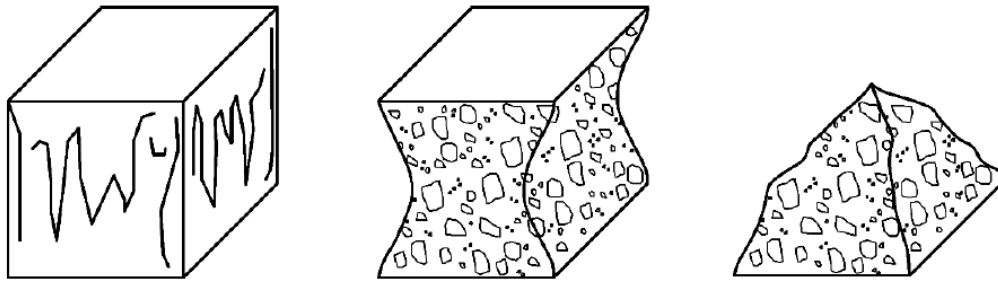


Figura 67. Roturas satisfactorias de probetas cúbicas en el ensayo de resistencia a compresión según la Norma UNE-EN 12390-3.

4.3. Ensayo de hormigón endurecido – Tracción indirecta

4.3.1. Cálculos del ensayo de tracción indirecta

Los cálculos realizados para calcular la resistencia a tracción indirecta se muestran a continuación.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

Donde:

- $f_{ct,sp}$ es la resistencia a tracción indirecta, en megapascuales (MPa).
- F es la carga máxima aplicada sobre la probeta, en newtons (N).
- L es la longitud de la línea de contacto de la probeta, en milímetros (mm).
- d es la dimensión de la sección transversal, en milímetros (mm).

En este caso el único parámetro que varía de un tipo de hormigón a otro es la carga máxima aplicada sobre la probeta, por lo que el resto de parámetros, a parte de la resistencia a tracción indirecta, tienen valores constantes.

- $L = 300 \text{ mm}$, corresponde con la longitud de la probeta.
- $d = 150 \text{ mm}$, corresponde con el diámetro de la probeta.

La desviación se calcula a partir de la variación entre los tres valores de resistencia obtenidos tras realizar la conversión previa.

Y, por último, el valor f_{ct} , que corresponde a la resistencia a tracción, se calcula a partir del valor de la resistencia a tracción indirecta según el Eurocódigo 2 y el Código Estructural como:

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp}$$

4.3.2. Resultados del ensayo de tracción indirecta

Los resultados del ensayo de tracción indirecta también se basan en la fuerza realizada por el sistema de compresión, pero su conversión a resistencia debe ser calculada de una forma distinta a la previamente mostrada en otros ensayos. Esto se ha explicado en el apartado previo de cálculos. El valor de fuerza resultante es obtenido a partir del software del sistema utilizado en el ensayo y sus valores se muestran en la Tabla 20 como RTI 1, RTI 2 y RTI 3. A partir de estos se calculan los valores de $f_{ct,sp}$.

Tabla 20. Resultados de fuerza y resistencia del ensayo de tracción indirecta.

| Serie | RTI 1 (kN) | RTI 2 (kN) | RTI 3 (kN) | fct,sp 1 (MPa) | fct,sp 2 (MPa) | fct,sp 3 (MPa) |
|-------|------------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| AP20 | 189,1 | 223,8 | 210,0 | 2,675 | 3,166 | 2,971 |
| AP50 | 208,1 | 206,4 | - | 2,944 | 2,920 | - |
| AP100 | 217,6 | - | 172,0 | 3,078 | - | 2,433 |
| GP20 | 198,0 | - | 219,0 | 2,801 | - | 3,098 |
| GP50 | 193,7 | 226,4 | 178,6 | 2,740 | 3,203 | 2,527 |
| GP100 | 187,4 | 206,0 | 155,0 | 2,651 | 2,914 | 2,193 |
| REF | 200,0 | 191,8 | 189,7 | 2,829 | 2,713 | 2,684 |

Para conocer el valor de la resistencia a tracción se calcula el promedio de los valores de $f_{ct,sp}$. Los resultados se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Resultados de resistencia a tracción indirecta.

| Serie | fct,sp promedio (MPa) | Desviación (MPa) | fct (MPa) |
|-------|-----------------------|------------------|-----------|
| AP20 | 2,937 | 0,247 | 2,644 |
| AP50 | 2,932 | 0,017 | 2,639 |
| AP100 | 2,756 | 0,456 | 2,480 |
| GP20 | 2,950 | 0,210 | 2,655 |
| GP50 | 2,823 | 0,346 | 2,541 |
| GP100 | 2,586 | 0,365 | 2,327 |
| REF | 2,742 | 0,077 | 2,468 |

Para mejorar la comprensión de los resultados obtenidos en las tablas previas, se han representado los valores de $f_{ct,sp}$ sobre una gráfica, mostrada en la Figura 68.

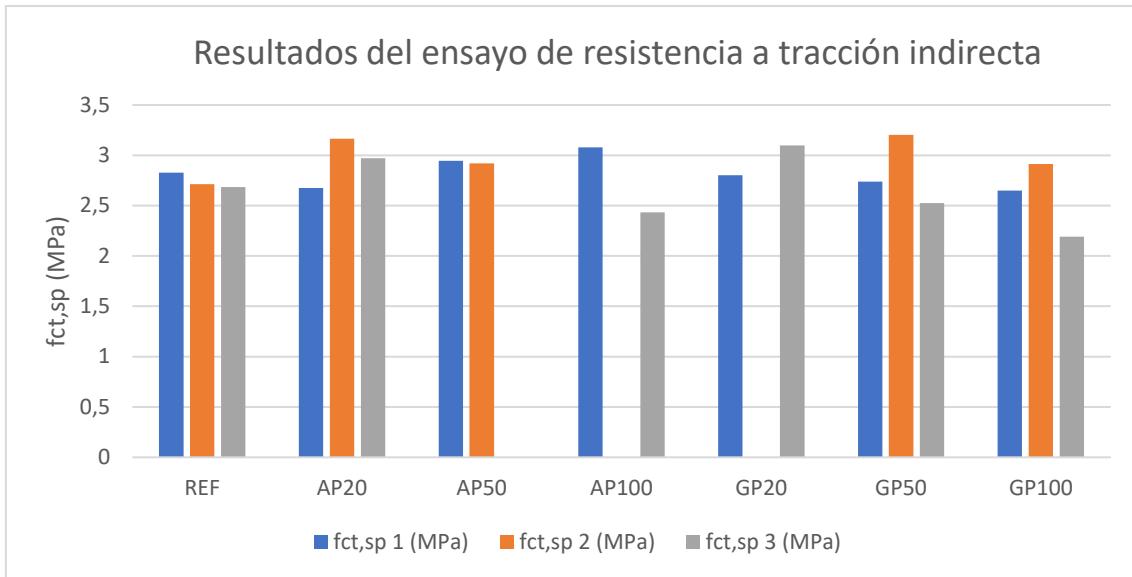


Figura 68. Resultados del ensayo de resistencia a tracción indirecta.

En la Figura 69 se muestran los resultados de la resistencia a tracción con las respectivas desviaciones de cada uno de los hormigones estudiados.

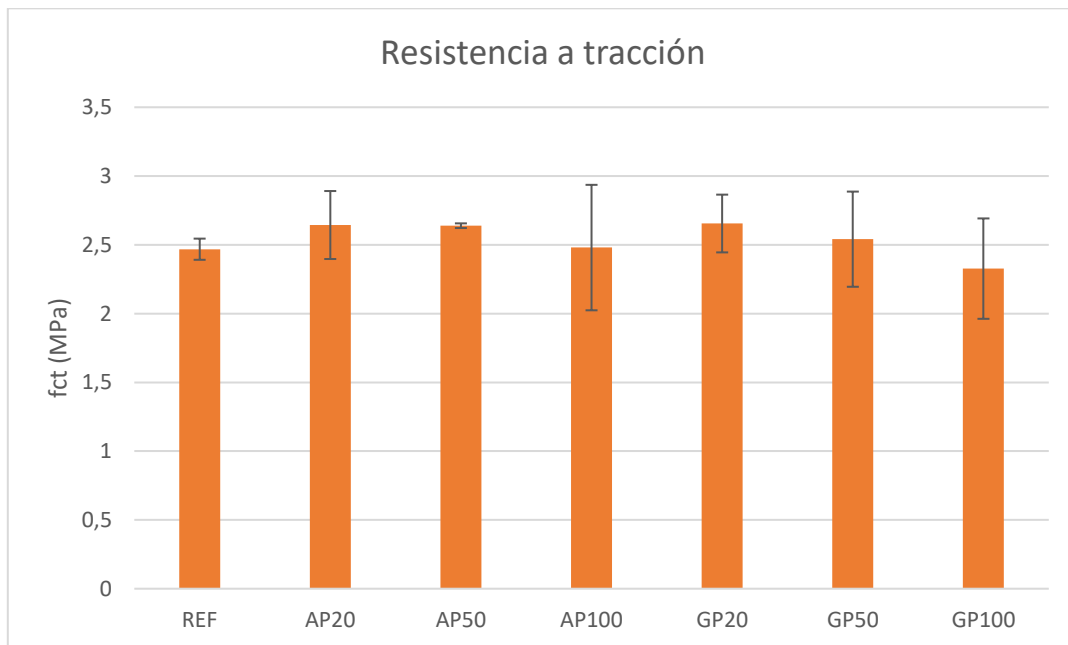


Figura 69. Resistencia a tracción.

Con el objetivo de visualizar la segregación, la homogeneidad y, en general, la distribución de los áridos a lo largo de la pieza se ha realizado el seguimiento de cada uno de los hormigones mediante fotografías. En estas se indica, mediante la colocación de un papel orientativo, la parte de arriba y debajo de la pieza. Esto es clave a la hora de encontrar posibles desigualdades en la distribución del árido, ya que indica exactamente en qué plano de la pieza se producen los defectos, principalmente de segregación y falta de homogeneidad.

La Figura 70 muestra el resultado del ensayo de tracción indirecta del hormigón AP20. Se observa un aspecto bastante neutro sin ninguna incidencia.



Figura 70. Ensayo de resistencia a tracción indirecta del hormigón AP20.

La Figura 71 muestra el resultado del ensayo de tracción indirecta del hormigón AP50. Se observa, al igual que en el caso anterior, un aspecto neutro del material sin existencia de segregación.

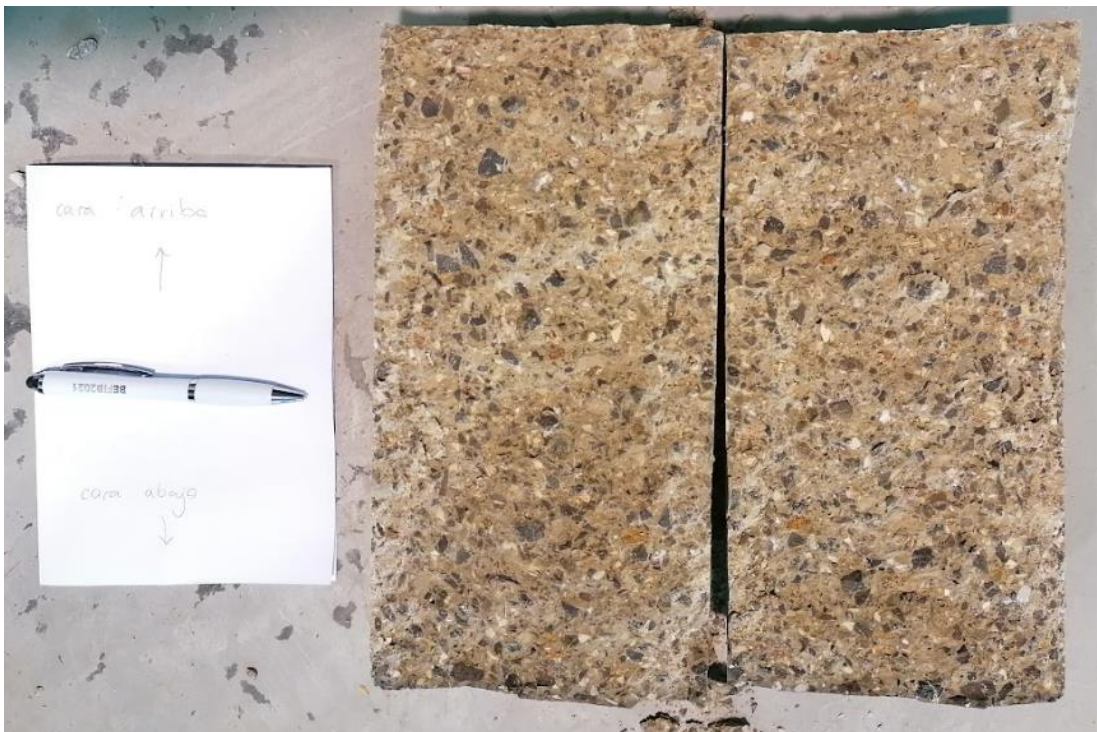


Figura 71. Ensayo de resistencia a tracción indirecta del hormigón AP50.

La Figura 72 muestra el resultado del ensayo de tracción indirecta del hormigón AP100. Se observa una buena homogeneidad, con ausencia total de segregación. Además, se detectan algunos áridos de color más blanquecino, por la introducción del 100% de arena porcelánica.

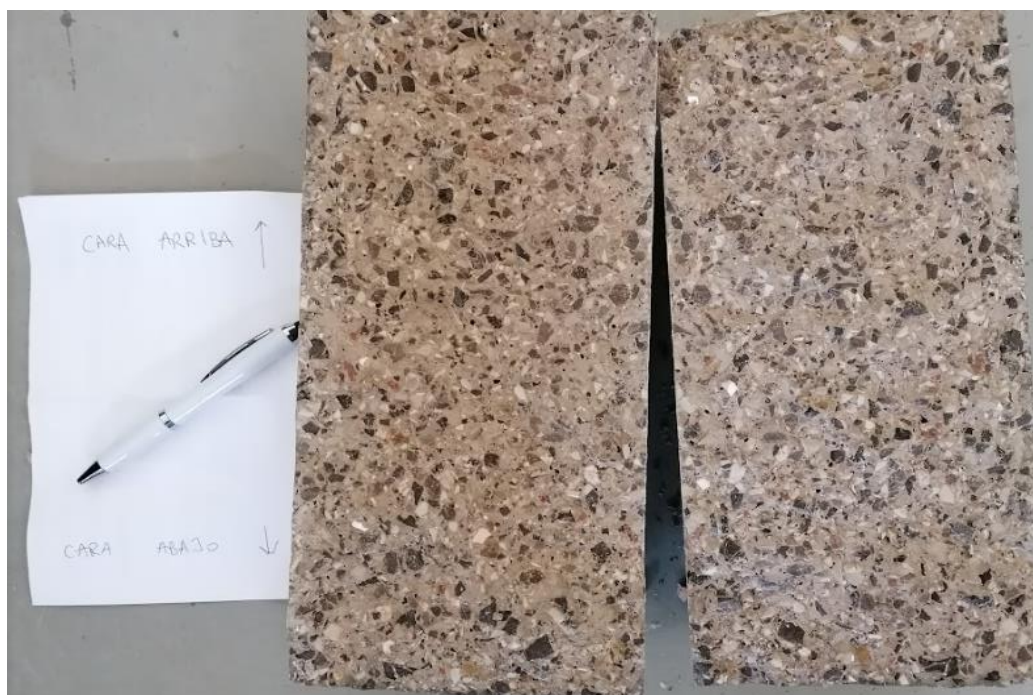


Figura 72. Ensayo de resistencia a tracción indirecta del hormigón AP100.

La Figura 73 muestra el resultado del ensayo de tracción indirecta del hormigón GP20. Se observa una buena distribución de los áridos, de forma homogénea y sin segregación. El color blanquecino por la introducción de grava porcelánica ya es notable.



Figura 73. Ensayo de resistencia a tracción indirecta del hormigón GP20.

La Figura 74 muestra el resultado del ensayo de tracción indirecta del hormigón GP50. Se observa que, aunque ha aumentado la cantidad de árido grueso, el cual tiene menor absorción de agua y provoca una mayor fluidez en el hormigón, se ha mantenido estable la homogeneidad y no presenta signos de segregación.



Figura 74. Ensayo de resistencia a tracción indirecta del hormigón GP50.

La Figura 75 muestra el resultado del ensayo de tracción indirecta del hormigón GP100. Se observa una buena distribución del árido, sin segregación y con una muy buena homogeneidad. Además, se aprecia ese color totalmente blanco en los áridos, provocado por la sustitución del 100% del árido grueso por árido reciclado porcelánico.



Figura 75. Ensayo de resistencia a tracción indirecta del hormigón GP100.

La Figura 76 muestra el resultado del ensayo de tracción indirecta del hormigón REF. Se observa el aspecto neutro de un hormigón convencional, con buena homogeneidad y nada de segregación.



Figura 76. Ensayo de resistencia a tracción indirecta del hormigón REF.

Además, se ha analizado minuciosamente el interior de las probetas que han sido testadas con el objetivo de estudiar la porosidad, el efecto del esmalte del árido cerámico en el hormigón y otras posibles incidencias que pudieran haber surgido. En este caso, se ha observado muchos casos de porosidad, con cavidades de distintos tamaños pero que no suponen ningún tipo de problema ya que no afectan a la resistencia del hormigón, tal y como se ha observado en los resultados de todos los ensayos. La Figura 77, Figura 78 y Figura 79 muestran dicha porosidad en diferentes hormigones.



Figura 77. GP20. Detalle de la porosidad existente en la probeta del hormigón GP20. Detalle de la superficie esmaltada junto a los poros presentes en la probeta GP20.



Figura 78. GP50. Detalle de la porosidad existente en la probeta del hormigón GP50. Detalle de la superficie esmaltada de la grava porcelánica reciclada en el hormigón GP50.



Figura 79. GP100. Detalle de porosidad y superficie esmaltada de color blanco y negro en el hormigón GP100, por provenir la grava porcelánica de diferentes productos de la industria cerámica (diferentes tipos de esmalte).

4.3.3. Conclusiones del ensayo de tracción indirecta

En cuanto a la visualización de los resultados respecto a la segregación, se observa cómo no existe ningún indicio claro. En un principio, considerando las densidades tanto del árido calizo como la del árido porcelánico, se esperaba que el árido porcelánico quedara concentrado en la parte superior de la probeta ya que el valor de su densidad es menor que la del árido calizo (2,3 kg/l del árido porcelánico frente a 2,7 kg/l del árido calizo). Pero como se observa en las imágenes previas, no existe segregación. Esto es debido a que en su conjunto los hormigones fabricados tienen un buen comportamiento, con cohesión y homogeneidad.

En cuanto a los resultados del ensayo, se observa cómo todos los tipos de hormigón obtienen valores muy semejante en resistencia a tracción, con una ligera tendencia decreciente al aumentar el contenido de árido. Esto es un buen resultado ya que se está demostrando, junto con el ensayo a compresión, que el hormigón fabricado con árido reciclado cerámico, en este caso porcelánico, es suficientemente apto para su uso como hormigón estructural.

Indagando en los resultados, puede resaltar la tendencia a la baja de la resistencia a tracción cuando el contenido de árido porcelánico aumenta. Esto podría ser explicado con el efecto de la superficie esmaltada del árido porcelánico sobre el hormigón. En el ensayo de tracción indirecta se está comprobando qué grado de adherencia tiene un hormigón, por lo que, si la

mayoría del árido tiene una superficie esmaltada y poco rugosa, esta adherencia se ve debilitada por ser menos capaz de adherirse al resto de elementos que forman el hormigón, entre ellos el cemento.

Ahora bien, en cuanto a la semejanza de resultados entre las mismas probetas, se afirma que, sin tener en cuenta los tres casos inválidos que posteriormente se explican, existe bastante similitud que acredita una buena realización de los ensayos de tracción indirecta, y se observa también el grado de similitud que existe entre los valores de resistencia a tracción de cada uno de los hormigones estudiados.

Cabe destacar que la Tabla 20 tiene valores nulos debido a fallos durante la realización del ensayo. Estos fallos se deben a una inclinación excesiva del plato que ha provocado que la probeta se rompiera de forma inválida, a un error de colocación de la probeta y a un error no reconocido pero cuyo resultado ha sido incongruente.

5. Aplicación práctica: estudio del comportamiento del hormigón fabricado con árido reciclado expuesto a altas temperaturas

5.1. Resultados

En principio, los resultados de la resistencia a compresión a altas temperaturas del hormigón fabricado con árido porcelánico se prevén mejores que los marcados en la norma para los áridos calcáreos o sílices. Esto, como se ha explicado anteriormente, se explicaría gracias al tratamiento de estabilización y cocción que se le ha aplicado al árido en su ciclo de vida, lo cual proporcionaría al hormigón una buena estabilidad cuando este estuviera expuesto a altas temperaturas.

A continuación, en la Tabla 22, se muestran los resultados del ensayo de resistencia a compresión sobre las probetas cúbicas, además de la media resultante y la desviación de los ensayos realizados. Además, en la Tabla 23 se muestran los coeficientes de reducción de la resistencia según la temperatura y el hormigón estudiado, que indican el efecto que ha tenido la temperatura en la resistencia del hormigón.

Tabla 22. Valores de resistencia a compresión a temperaturas de 20, 200, 400, 600 y 800°C para el hormigón REF, GP50, AP50, GP100 y AP100.

| T (°C) | Nombre | REF | GP50 | AP50 | GP100 | AP100 |
|--------|------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 20°C | P1 (MPa) | 29,99 | 30,38 | 38,33 | 39,71 | 37,88 |
| | P2 (MPa) | 33,2 | 34,52 | 41,01 | 39,5 | 37,37 |
| | P3 (MPa) | 30,43 | 34,92 | 27,74 | 40,91 | 32,6 |
| | Media (MPa) | 31,21 | 33,27 | 35,69 | 40,04 | 35,95 |
| | Desviación (MPa) | 6,06 | 12,64 | 98,47 | 1,16 | 16,96 |
| 200°C | P1 (MPa) | 13,33 | 16,33 | 36,41 | 20,64 | 26,07 |
| | P2 (MPa) | 24,6 | 17,42 | 33,3 | 20,92 | 24,96 |
| | P3 (MPa) | 9,01 | 17,99 | 33,78 | 22,78 | 32,09 |
| | Media (MPa) | 15,65 | 17,25 | 34,50 | 21,45 | 27,71 |
| | Desviación (MPa) | 129,57 | 1,42 | 5,61 | 2,71 | 29,44 |
| 400°C | P1 (MPa) | 34,59 | 29,49 | 37,88 | 34,71 | 33,04 |
| | P2 (MPa) | 36,11 | 29,75 | 34,52 | 37,15 | 39 |
| | P3 (MPa) | 33,6 | 30,6 | 29,1 | 36,27 | 28,87 |
| | Media (MPa) | 34,77 | 29,95 | 33,83 | 36,04 | 33,64 |
| | Desviación (MPa) | 3,20 | 0,67 | 39,25 | 3,05 | 51,84 |
| 600°C | P1 (MPa) | 30,43 | 27,5 | 25,36 | 29,14 | 24,39 |
| | P2 (MPa) | 30,72 | 26,74 | 34,38 | 30,7 | 24 |
| | P3 (MPa) | 33,98 | 27,19 | 39,15 | 30,65 | 33,05 |
| | Media (MPa) | 31,71 | 27,14 | 32,96 | 30,16 | 27,15 |
| | Desviación (MPa) | 7,77 | 0,29 | 98,09 | 1,57 | 52,35 |
| 800°C | P1 (MPa) | 11,09 | 6,85 | 13,28 | 8,01 | 15,07 |
| | P2 (MPa) | 15,54 | 8,73 | 12,27 | 10,04 | 17,56 |
| | P3 (MPa) | 9,4 | 10,1 | 11,97 | 8,07 | 13,23 |
| | Media (MPa) | 12,01 | 8,56 | 12,51 | 8,71 | 15,29 |
| | Desviación (MPa) | 20,12 | 5,32 | 0,94 | 2,67 | 9,44 |

Tabla 23. Valores del coeficiente de reducción de la resistencia para las temperaturas de 20, 200, 400, 600 y 800°C.

| Coeficiente de reducción de la resistencia por temperatura | | | | | |
|--|------|------|------|-------|-------|
| T (°C) | REF | GP50 | AP50 | GP100 | AP100 |
| 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 200 | 0,50 | 0,52 | 0,97 | 0,54 | 0,77 |
| 400 | 1,11 | 0,90 | 0,95 | 0,90 | 0,94 |
| 600 | 1,02 | 0,82 | 0,92 | 0,75 | 0,76 |
| 800 | 0,38 | 0,26 | 0,35 | 0,22 | 0,43 |

En la Figura 80 se muestran estos mismos datos de una forma más clara y visual.

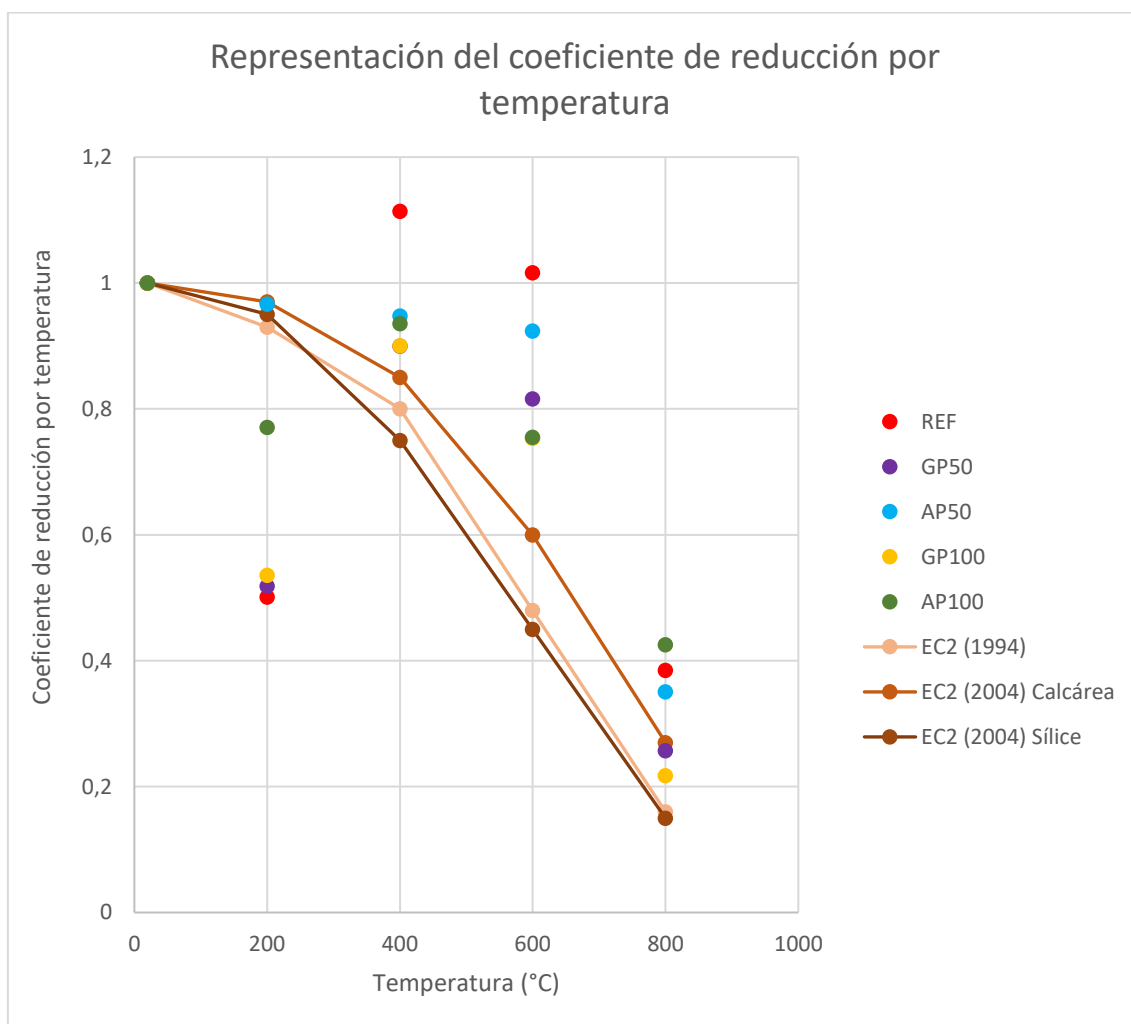


Figura 80. Coeficiente de reducción de la resistencia según la temperatura y hormigón estudiado.

Durante estos ensayos, también se ha registrado la deformación que ha experimentado cada probeta. Los resultados extraídos a partir del montaje utilizando el reloj comparador se muestran en la Tabla 24, además de los valores establecidos para cada temperatura por el Eurocódigo 2.

Tabla 24. Resultados de deformación y valores establecidos por el Eurocódigo 2.

| Deformación ϵ (%) | | | | | | |
|----------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T (°C) | Natural | GP50 | AP50 | GP100 | AP100 | EC2 |
| 20 | - | - | 0,64% | - | - | - |
| 200 | - | 0,46% | 0,79% | 0,41% | 0,60% | 0,55% |
| 400 | - | 0,90% | 1,31% | 0,73% | 1,04% | 1,00% |
| 600 | - | 0,63% | 1,21% | 0,58% | 1,11% | 2,50% |
| 800 | 1,37% | 1,12% | 0,65% | 0,67% | 1,52% | 2,50% |

Para obtener estos datos de deformación, se ha medido la variación de altura del plato inferior de la máquina de ensayo, que es el plato móvil sobre el cual se aplica la fuerza y, en consecuencia, el movimiento, desde el momento en el que se aplica la precarga hasta que la

probeta cede. Este valor debe ser comparado con la altura de la probeta, que al ser una probeta cúbica dicho valor equivale al del lado, es decir, 100 mm. Con estos datos y haciendo la media sobre los tres ensayos realizados de cada tipo de hormigón en cada una de las temperaturas estudiadas, se han obtenido los valores de la Tabla 22.

Cabe destacar que no se han realizado algunos ensayos de deformación, sobre todo los del hormigón REF y los de temperatura de 20°C porque el objetivo de llevar a cabo estos ensayos de deformación es conocer a grandes rasgos las características y el comportamiento del hormigón fabricado con árido porcelánico reciclado.

Para observar mejor los resultados de deformación de cada tipo de hormigón en cada una de las temperaturas estudiadas, se ha representado el gráfico mostrado en la Figura 81.

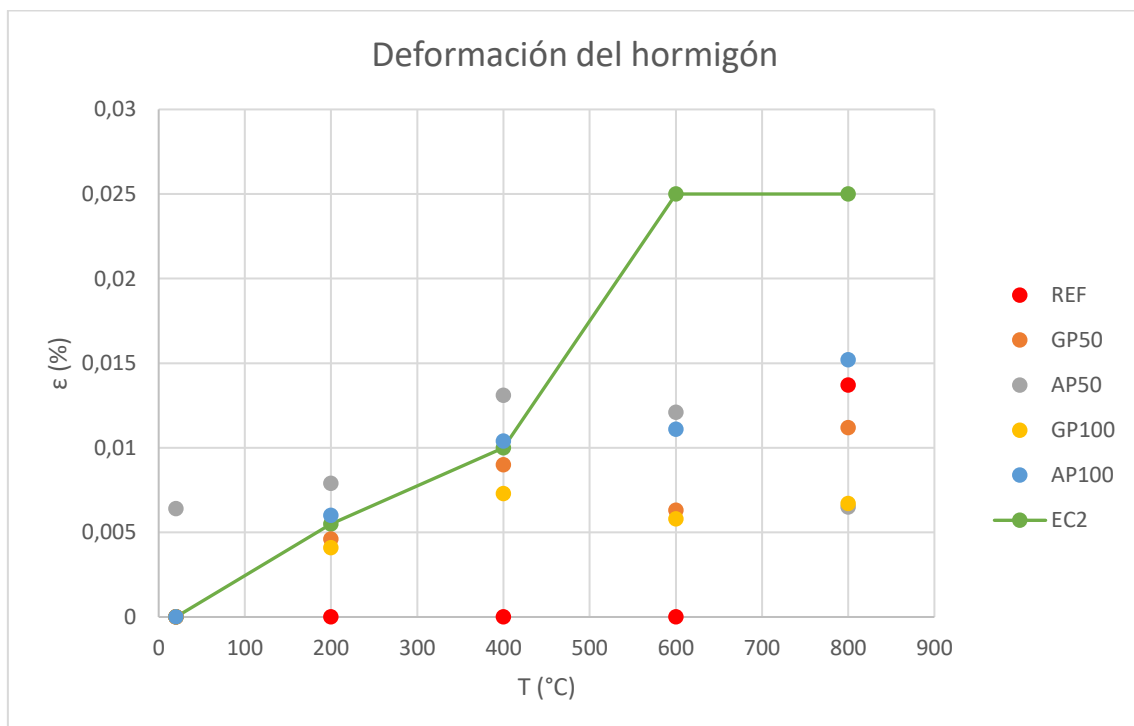


Figura 81. Deformación del hormigón REF, GP50, AP50, GP100 y AP100 según la temperatura estudiada.

5.2. Conclusiones de los resultados de la aplicación de altas temperaturas

En este apartado se discuten los resultados previamente mostrados con el objetivo de extraer conclusiones claras sobre el comportamiento del hormigón fabricado con árido porcelánico reciclado expuesto a altas temperaturas.

En cuanto a la resistencia a compresión, se observa cómo los resultados a partir de los ensayos realizados sobre las probetas a altas temperaturas obtienen unos valores del coeficiente de reducción de la resistencia que distan de los marcados por la normativa actual, cuyos valores son mostrados en la Tabla 16. Se observa cómo en una temperatura de 200°C el valor de resistencia de todos los tipos de hormigón disminuye bastante respecto a lo esperado. No

obstante, a partir de 400°C, el coeficiente de reducción de la resistencia aumenta superando lo previsto. Los ensayos a 600°C siguen esta tendencia con valores por encima de lo marcado por la normativa. Y, por último, en 800°C se igualan los valores, resultando finalmente en lo que se había previsto para estos tipos de hormigón.

Esta variación respecto a los valores marcados por el EuroCódigo 2 podría tener diversas explicaciones. Primero de todo, se debe resaltar que estos ensayos se están realizando sobre probetas en caliente, extraídas del horno en los instantes previos al ensayo. Según la normativa, los valores sobre los que se están comparando los resultados se refieren a la resistencia a compresión que tiene el hormigón una vez ha vuelto a temperatura ambiente tras haber sido expuesto a altas temperaturas. A partir de aquí, es posible realizar hipótesis y extraer conclusiones.

La primera teoría sobre estos resultados viene a explicar el comportamiento del hormigón a 200°C. Esta es una temperatura lo suficientemente alta, pero no excesivamente alta, sobre la que la humedad que contiene el hormigón se convierte en vapor de agua y este queda atrapado en los poros de la probeta. Esto provocaría unas tensiones internas que, junto a la fuerza de compresión aplicada sobre la probeta, causaría una rotura prematura dando unos valores de resistencia mucho menores a los esperados.

La segunda teoría es que, debido al ensayo sobre probetas en caliente, los efectos provocados por el calentamiento y posterior enfriamiento del hormigón no aparecen al no haber enfriamiento. Durante el calentamiento de las probetas ocurren distintos cambios físicos y químicos en el hormigón, pero su efecto sobre la resistencia no resulta crítico. Puede que el proceso de enfriamiento sea el responsable de que se produzca una reconfiguración en la microestructura del hormigón, haciendo que este se debilite mucho más.

Con estas dos teorías se explicaría la poca prestación del hormigón en temperaturas que rondan los 200°C y su buen comportamiento a altas temperaturas, dentro de sus capacidades, y teniendo en cuenta los efectos irreversibles que provoca la exposición del hormigón a altas temperaturas sobre las propiedades físicas y químicas.

Además, se ha observado durante los distintos ensayos que la rotura de las probetas se realiza por capas en el rango de temperaturas bajo (200 - 400°C), mientras que en temperaturas elevadas (600 - 800°C) se produce una desintegración de la probeta casi completa (Figura 83). La rotura por capas se ha identificado como *spalling*, debido al efecto de la temperatura sobre el hormigón (Figura 82).



Figura 82. Spalling en la probeta de hormigón REF en el ensayo de 200°C.



Figura 83. Desintegración de la probeta de hormigón GP50 en el ensayo de 800°C.

En cuanto a los resultados de deformación, se observa cómo existe una tendencia creciente conforme aumenta la temperatura. Esto se explica mediante la deshidratación que va sufriendo el hormigón. La deshidratación es un efecto de la exposición prolongada a altas temperaturas que afecta al contenido en humedad del hormigón y a la pasta de cemento, y todo ello resulta en una disminución de la rigidez elástica del hormigón. En consecuencia, a mayor temperatura, mayor será la capacidad del hormigón de deformarse sin ocasionarse su rotura.

Además, se ha observado durante los distintos ensayos que se han realizado sobre el hormigón en caliente que el color de las probetas varía según la temperatura a la que han sido expuestas. En la Figura 84 se muestra el caso del GP50 a 800°C.



Figura 84. Cambio de color de las probetas cúbicas de GP50 a 800°C.

6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1. Conclusiones

En este proyecto se ha estudiado y analizado el uso de residuos porcelánicos provenientes de la industria cerámica para la fabricación de hormigón estructural.

La manera de estudiar dichos áridos ha sido siguiendo los estándares que se utilizarían en cualquier otro tipo de árido permitido para la fabricación de hormigón estructural. Inicialmente, se ha llevado a cabo un estudio de granulometría, densidad y absorción de agua con el objetivo de conocer el material. Seguidamente, se ha fabricado el hormigón en distintas proporciones de árido porcelánico, mezclándolo con árido calizo a la vez que se realizaban los ensayos de asentamiento. Posteriormente, se han realizado los ensayos de resistencia a compresión y tracción indirecta para conocer el comportamiento y la resistencia del material. Y, por último, se ha realizado una aplicación como hormigón expuesto a altas temperaturas para comprobar si el tratamiento térmico del árido porcelánico aportaba mejoras respecto a los hormigones con áridos convencionales.

La conclusión general de este estudio es que el árido reciclado porcelánico proveniente de los residuos de la industria cerámica es apto para la fabricación de hormigón estructural.

La conclusión que se ha extraído del ensayo de asentamiento, tanto el realizado al principio de la amasada como el del final, ha sido que la fluidez del hormigón aumenta proporcionalmente con el aumento del porcentaje de árido porcelánico. Además, estas características se ven potenciadas cuando el árido es grueso. También se ha observado que en el primer ensayo los hormigones con más árido porcelánico pueden presentar segregación, pero esta desaparece en el segundo ensayo, tras varios minutos amasando la pasta.

En cuanto a las conclusiones extraídas del ensayo de resistencia a compresión, se afirma que el hormigón estructural con árido reciclado porcelánico es, por lo menos, igual de resistente que los hormigones convencionales fabricados con árido calizo. Los valores obtenidos en los ensayos indican que la resistencia a compresión es muy buena, tanto a los 7 como a los 28 días de curación. Además, comparando con los márgenes de desviación de los ensayos de cada tipo de hormigón, se aprecia como las diferencias entre unos y otros son mínimas.

Las conclusiones del ensayo de resistencia a tracción indirecta son muy semejantes a las del ensayo anterior. Los resultados indican que el hormigón fabricado con árido porcelánico reciclado resulta ser igual de resistente a tracción que los hormigones convencionales. Además, no existe segregación en las probetas, por lo que se asegura una buena distribución del material en cualquier aplicación, sin problemas de homogeneidad.

En cuanto a la aplicación del hormigón estructural fabricado con árido reciclado porcelánico expuesto a altas temperaturas, las conclusiones son dispares debido a la desviación de los resultados con lo que realmente se esperaba. En un principio, el hormigón con árido reciclado cerámico debería tener muchas ventajas respecto al hormigón convencional en esta aplicación, ya que el árido utilizado ha sido tratado y estabilizado térmicamente. Esto, a priori, hace que el material sea mucho más estable y que el árido no pueda reaccionar de ningún modo frente a la

variación de temperaturas que se produce, por ejemplo, en un incendio. En cambio, los resultados obtenidos son menos prometedores y es debido a que los ensayos de resistencia a compresión se han realizado con la pieza recién sacada del horno, a diferencia de la normativa, que habla sobre ensayos realizados una vez la pieza se ha enfriado tras exponerla a las temperaturas pertinentes. A partir de aquí, surge la necesidad de realizar este mismo estudio, pero utilizando probetas a temperatura ambiente tras haber sido enfriadas.

Finalmente, se concluye, tal y como se ha dicho al comienzo de este apartado, que el árido reciclado cerámico, en este caso el porcelánico, es un material perfectamente apto para ser utilizado en la fabricación de hormigón estructural, por su buena resistencia a compresión y a tracción, su buena consistencia a lo largo de su amasada y por su gran potencial en aplicaciones a altas temperaturas

6.2. Futuras líneas de investigación

Siguiendo con lo expuesto en el apartado anterior, existe un amplio abanico de posibilidades para poder seguir estudiando el material porcelánico. Además, las líneas de investigación que a continuación se van a exponer, así como todo el proyecto en general, sirven para cualquier otro material cerámico que pueda ser reciclado y aplicado en la fabricación de hormigón estructural. Algunas de las líneas de investigación en las que sería interesante indagar son:

- Aplicación de hormigón estructural fabricado con árido reciclado porcelánico expuesto a altas temperaturas con probetas a temperatura ambiente tras su ciclo de horno. Tras realizar los ensayos con las probetas en caliente, sería revelador efectuar ensayos con probetas expuestas a altas temperaturas dejándolas enfriar antes de comprobar su resistencia. La comparación con la normativa actual sería la correcta y daría información veraz sobre la resistencia de este tipo de hormigón ante incendios. Además, también se podría comprobar la diferencia entre probetas enfriadas mediante distintos métodos, pudiendo simular la forma en la que se extinguen los incendios.
- Una buena línea de investigación sería también continuar con los estudios de viabilidad de otros tipos de material cerámico para aplicaciones en hormigón estructural. El objetivo último es lograr suficiente evidencia científica para que la normativa pueda ser modificada para incluir el residuo cerámico como opción de árido reciclado.
- Otro objetivo es conocer qué porcentajes de sustitución de árido convencional por árido reciclado cerámico es factible para conseguir un hormigón estructural funcional. Los estudios necesarios para lograr dicho objetivo deben ir enfocados a comprobar todo tipo de combinaciones de áridos y porcentajes de sustitución para conocer el comportamiento del hormigón en función de su contenido en árido reciclado.

Así pues, tras comprobar la aptitud del árido porcelánico como material para fabricar hormigón estructural, proveniente de los residuos de la industria cerámica, se abren muchos caminos que deben ser investigados para conseguir una buena gestión de residuos cerámicos y una mejora sustancial en sostenibilidad medioambiental.

7. Presupuesto

En este apartado se pretende exponer el presupuesto que ha supuesto la realización del estudio sobre el material cerámico porcelánico como posible árido para la fabricación de hormigón estructural.

Para realizar dicho estudio, se ha utilizado material para realizar las primeras amasadas de donde se extraen 6 probetas cúbicas, 2 probetas cilíndricas y 2 conos para el ensayo de asentamiento. También hay que tener en cuenta el material utilizado en los ensayos de caracterización de los áridos utilizados: ensayo de granulometría y ensayo de densidad y absorción de agua. Y, por último, el material utilizado en las amasadas del hormigón expuesto a altas temperaturas, el cual corresponde con 15 probetas cúbicas para realizar el ensayo de resistencia a compresión a 5 temperaturas distintas.

A parte, también se considera el uso de las máquinas. En este caso, las máquinas empleadas durante el transcurso del proyecto son la amasadora, la máquina de ensayo, el horno y la cámara humidificadora. La forma en la que se ha expresado dicha información es a través del coste horario de cada máquina, considerando las horas totales que ha sido utilizada en el proyecto.

También se debe tener en cuenta la mano de obra que participa en el proyecto ya que son muchos sus participantes. El equipo encargado del estudio está formado por un ingeniero, un ingeniero junior y un técnico de taller. A la hora de realizar el presupuesto, es necesario considerar las horas que han estado invirtiendo en la consecución de los objetivos.

Así pues, se muestra a continuación, en la Tabla 25 el presupuesto del proyecto dividido en los apartados previamente explicados.

Tabla 25. Presupuesto del proyecto.

| Unidad | Definición | Coste (€/ud.) | Coste total (€) |
|--|--|---------------|-------------------|
| MATERIAL PARA AMASADAS: ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, A TRACCIÓN INDIRECTA Y APLICACIÓN DE EXPOSICIÓN A ALTAS TEMPERATURAS | | | |
| 0,066 | Tiesto porcelánico - Árido reciclado 0-4 mm - Saca 1.000 kg | 13,00 € | 0,86 € |
| 0,110 | Tiesto porcelánico - Árido reciclado 6-12 mm - Saca 1.000 kg | 11,00 € | 1,21 € |
| 20 | Refractario I-5x11x22 | 1,69 € | 33,80 € |
| 0,401 | Gravilla lavada 4/11 mm - Saca 1.000 kg | 21,63 € | 8,68 € |
| 0,242 | Arena lavada 0/4 mm - Saca 1.000 kg | 24,40 € | 5,89 € |
| 9 | Cemento CEM II/B-L 32,5 N Élitecementos 25 kg | 3,00 € | 27,00 € |
| 0,12 | Sika Desencofrante D – 25 L | 117,00 € | 14,04 € |
| 0,22 | FLUIS Aditivo fluidificante y reductor de agua para morteros y hormigones 5L | 38,24 € | 8,41 € |
| | | TOTAL: | 99,89 € |
| MATERIAL PARA CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS | | | |
| 1 | Material para los análisis granulométricos | 53,33 € | 1.150,00 € |
| 1 | Material para el ensayo de densidad y absorción de agua | 45,81 € | 45,81 € |
| | | TOTAL: | 1.195,81 € |
| MANO DE OBRA | | | |
| 90 | Ingeniero Junior | 10,00 € | 900,00 € |
| 120 | Ingeniero | 15,00 € | 1.800,00 € |
| 126 | Técnico de laboratorio | 11,00 € | 1.386,00 € |
| | | TOTAL: | 4.086,00 € |
| USO DE MÁQUINAS | | | |
| 10 | Amasadora de hormigón | 9,00 € | 90,00 € |
| 42 | Máquina de ensayo | 12,00 € | 504,00 € |
| 672 | Cámara humidificadora | 1,20 € | 806,40 € |
| 35 | Horno industrial | 16,00 € | 560,00 € |
| | | TOTAL: | 1.960,40 € |
| TOTAL: | | | 7.342,10 € |

El presupuesto total del proyecto ha sido de siete mil trescientos cuarenta y dos euros con diez céntimos.

8. Bibliografía

- [1] Ibáñez-Forés, V., Gómez-Parra, A., Bovea, M., Gallardo, A., & Colomer, F. (s.f.). *Caracterización de residuos sólidos en la industria cerámica y su relación con las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs)*.
- [2] La industria cerámica apuesta por la economía circular para garantizar la sostenibilidad de la edificación. (2022). *Conarquitectura*.
- [3] Luaces, C. (2010). Los áridos. *Canales Sectoriales*.
- [4] Medina Martínez, C., Sánchez de Rojas, M. I., & Frías Rojas, M. (2012). *Valorización de los residuos de la industria cerámica sanitaria como árido grueso reciclado en la fabricación de hormigones*. Cemento Hormigón.
- [5] Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2009). *Reusing ceramic wastes in concrete*. Guimarães, Portugal: Department of Civil Engineering.
- [6] Ray, S., Haque, M., Sakib, N., & Ferdous Mita, A. (2021). *Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production*. Bangladesh.
- [7] Vicente, D. (2 de 01 de 2018). Cerámica sostenible: 'rescate' de residuos y cogeneración. *EL MUNDO*.
- [8] Vilas Meena, R., Kumar Jain, J., Sing Chouhan, H., & Singh Beniwal, A. (2022). *Use of waste ceramics to produce sustainable concrete*. India.
- [9] Xargay, H., Ripani, M., Sambarato, L., & Folino, P. (2016). *Degradación de hormigones frente a altas temperaturas*. Facultad de Ingeniería, UBA.
- [10] UEPG, U. E. (2020). *Visión 2020 para una Industria de los Áridos Sostenible*.
- [11] Unión Española de Normalización. (2012). *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado (UNE EN 933-9)*.
- [12] Unión Española de Normalización. (2014). *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua (UNE-EN 1097-6)*.
- [13] Unión Española de Normalización. (2020). *Ensayos de hormigón fresco (UNE-EN 12350-2)*
- [14] Unión Española de Normalización. (2020). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia (UNE-EN 12390-2)*
- [15] Unión Española de Normalización. (2020). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas (UNE-EN 12390-3)*.

- [16] Unión Española de Normalización. (2020). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas (UNE-EN 12390-6).
- [17] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (2021) Código Estructural.