



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

El uso de residuos de construcción y demolición (RCD)  
para la fabricación de hormigón estructural

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

AUTOR/A: Mata Rodriguez, Laura

Tutor/a: Valcuende Payá, Manuel Octavio

Cotutor/a: Lliso Ferrando, Josep Ramon

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## **Resumen y palabras clave**

La arquitectura y el sector de la construcción son responsables en gran medida de la contaminación y del consumo de los recursos, por eso en los últimos años se está reivindicando una gestión más eficaz de los recursos naturales que tenemos.

Mediante este trabajo se investiga acerca de la posibilidad de incorporar áridos reciclados como parte del proceso de creación de hormigón estructural.

En primer lugar se realiza una búsqueda de la normativa que se aplica y un estado del arte acerca del tema. En la siguiente parte de este trabajo se llevan a cabo una serie de ensayos en el laboratorio realizando probetas para comprobar tanto mecánicamente como su durabilidad y así finalmente poder extraer las conclusiones sobre el uso de áridos reciclados para la construcción.

Hormigón

Áridos reciclados

Sostenibilidad

Residuos

Propiedades mecánicas

Durabilidad

## **Abstract and keywords**

Architecture and the construction sector are largely responsible of pollution and consumption of resources, which is why in recent years a more effective management of the natural resources we have has been vindicated.

Through this work, the possibility of incorporating recycled aggregates as part of the process of creating structural concrete is investigated.

In the first place, a search is made for the regulations that apply and a state of the art on the subject. In the next part of this work, a series of tests are carried out in the laboratory, making test tubes to check both mechanically and their durability and finally be able to draw conclusions about the use of recycled aggregates for construction.

Concrete

Recycled Aggregate

Sustainability

Waste

Mechanical properties

Durability

## **Resum i paraules claus**

L'arquitectura i el sector de la construcció són responsables en gran mesura de la contaminació i del consum dels recursos, per això els darrers anys s'està reivindicant una gestió més eficaç dels recursos naturals que tenim.

Mitjançant aquest treball s'investiga la possibilitat d'incorporar àrids reciclats com a part del procés de creació de formigó estructural.

En primer lloc es fa una cerca de la normativa que s'aplica i un estat de l'art sobre el tema. A la següent part d'aquest treball es duen a terme una sèrie d'assajos al laboratori realitzant provetes per comprovar-ne tant mecànicament com la durabilitat i així finalment extreure'n les conclusions sobre l'ús d'àrids reciclats per a la construcció.

Formigó

Àrids reciclats

Sostenibilitat

Residus

Propietats mecàniques

Durabilitat

## INDICE

### **ESTADO DEL ARTE**

1. Sostenibilidad
2. Situación RCD
3. Gestión de los residuos
  - 3.1. Ideas generales
  - 3.2. Ideas específicas
    - 3.2.1. Obras de construcción
    - 3.2.2. Hormigón
4. Árido reciclados
5. Código técnico

### **OBJETIVOS**

#### **PLAN EXPERIMENTAL**

1. Metodología
2. Fase 1
3. Fase 2
4. Ensayos
  - 4.1. Mecánicos
    - 4.1.1. Resistencia a compresión
  - 4.2. Durabilidad
    - 4.2.1. Absorción de agua, porosidad
    - 4.2.2. Carbonatación acelerada
    - 4.2.3. Migración de cloruros
    - 4.2.4. Resistividad eléctrica

### **RESULTADOS**

1. Resistencia a compresión
2. Absorción de agua, porosidad
3. Carbonatación acelerada
4. Migración de cloruros
5. Resistividad eléctrica

### **CONCLUSIONES**

### **BIBLIOGRAFÍA**

## **ESTADO DEL ARTE**

1. Sostenibilidad
2. Situación RCD
3. Gestión de los residuos
  - 3.1. Ideas generales
  - 3.2. Ideas específicas
    - 3.2.1. Obras de construcción
    - 3.2.2. Hormigón
4. Áridos reciclados
5. Código técnico

## 1. Sostenibilidad

Solo tenemos una Tierra, pero en 2050 el consumo mundial será el equivalente al de tres planetas.

Se calcula que el consumo mundial de materias como la biomasa, los combustibles fósiles, los metales y los minerales se duplicará en los próximos cuarenta años y que la generación anual de residuos se incrementará en un 70 % de aquí a 2050 (Comisión Europea, 2020).

En la actualidad, la necesidad es acelerar la transición hacia un modelo de crecimiento regenerativo que devuelva al planeta más de lo que toma de él, avanzar hacia el mantenimiento de su consumo de recursos dentro de los límites que encierra el planeta y, con tal fin, esforzarse por reducir su huella de consumo y duplicar su tasa de utilización de material circular en la próxima década (Comisión Europea, 2020). La UE lidera el camino hacia una economía circular a escala mundial y utiliza su influencia, su experiencia y sus recursos financieros para implementar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de 2030. (Comisión Europea, 2020).

El fin es transformar las pautas de consumo para evitar que se produzcan residuos en primer lugar. El objetivo es convertirnos en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, que produzca menos residuos y que utilice como recurso, siempre que sea posible, los que no pueden ser evitados.

En definitiva se trata de sustituir una economía lineal basada en producir, consumir y tirar, por una economía circular en la que se reincorporen al proceso productivo una y otra vez los materiales que contienen los residuos para la producción de nuevos productos o materias primas. En este planteamiento, el reciclaje o la valorización material de los residuos juegan un papel primordial. (PE-MAR,2016).

El consumo de energía y recursos naturales ha ido creciendo exponencialmente con el aumento significativo de las actividades económicas e industriales, convirtiéndose en una de las mayores preocupaciones ambientales de nuestro tiempo.

Varios sectores ya están buscando soluciones rentables al problema de los vertidos, reduciendo su producción y agregándoles valor a través de su reutilización o reciclándolos en nuevos productos, en vista de una economía circular. Esta transición progresiva y al mismo tiempo irreversible hacia un sistema económico sostenible es un componente indispensable. Según un estudio reciente (Comisión Europea, 2020), la aplicación de los principios de la economía circular a toda la economía de la UE podría crear unos 700.000 puestos de trabajo nuevos.

El objetivo es hacer que la sociedad europea sea eficiente en el uso de los recursos sobre la base de las 3R (Yeheyis et al., 2013), en las que la reducción o la prevención es la primera opción de gestión, seguida de la reutilización, el reciclaje y la valorización (incluida la valorización energética) y por último eliminación (depósito en rellenos sanitarios, entre otros). La Unión Europea debe convertirse en una sociedad “recicladora” y “sostenible” tal como se define en el informe Brundtland (Merino et al., 2010).

La preocupación por el medio ambiente ha aumentado últimamente la conciencia sobre la necesidad de reciclar en la industria de construcción. Sin embargo, algunas normas, como la española (nuevo código estructural), solo aceptan el reciclaje de áridos derivados del hormigón, lo que limita el uso extensivo de la construcción y demolición de los residuos, que se producen en volúmenes mucho mayores.

La construcción y el uso de edificios en la UE representan alrededor de la mitad de los materiales que se extraen y de la energía que se utiliza y aproximadamente un tercio del agua que es consumida. El sector genera asimismo en torno a un tercio de todos los residuos y contribuye a las presiones ambientales que se producen en las diferentes fases del ciclo de vida de los edificios, incluida la fabricación de productos de construcción, la construcción de edificios, la utilización, la renovación y la gestión de residuos de la construcción (Comisión Europea, 2014).

Los residuos de construcción y demolición son un problema importante en la sociedad moderna, ya que representan el 25-30% (G.Rodríguez et al., 2015) de todos los residuos sólidos generados anualmente. Su correcta gestión es uno de los pilares de la política europea de gestión de residuos, cuyo objetivo es romper la relación directa entre el crecimiento económico y el aumento de la generación de residuos, reduciendo el impacto ambiental asociado y fomentando el reciclaje y la sostenibilidad.

Como resultado, desde la aprobación de la Directiva Marco Europea 2008/98/EC (Unión Europea, 2008), los Estados miembros han promulgado legislación que establece incentivos para la gestión del ciclo de vida de los RCD. La gestión adecuada de esos residuos es uno de los pilares de la Estrategia 2020, “Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos”.

## 2. Situación RCD

A nivel internacional, los residuos de construcción y demolición (RCD) se encuentran entre las principales fuentes de residuos, aunque la crisis económica ha tenido un impacto tan fuerte en la industria de la construcción que ha reducido los volúmenes en los últimos 10 años (Coronado et al., 2011).

A pesar de esa reducción, en 2009 la UE produjo aproximadamente 530 millones de toneladas de RCD y España aproximadamente 35 (Comisión Europea, 2011), que representaron el 25-30% del total de residuos sólidos generados (Malia et al., 2013).

Se está implementando el fomento de una construcción y una renovación más eficientes en el uso de los recursos, por ejemplo reduciendo los residuos de la construcción y reciclando o reutilizando materiales y productos de manera que el volumen destinado a los vertederos sea menor.

El reciclado o reutilización de materiales o incluso de productos enteros está adquiriendo una importancia cada vez mayor como medio para mejorar el uso eficiente de los materiales y evitar los efectos negativos asociados al material virgen.

No obstante, el equilibrio general depende en gran medida de la existencia de un sistema de reciclaje eficiente a nivel local, regional o nacional que constituya una alternativa atractiva y rentable al depósito en vertederos. El atractivo de las alternativas de reciclaje está determinado por la distancia de transporte hasta los emplazamientos de reciclado, la consecución del nivel de pureza necesario de los materiales reciclados y los procesos de producción y reciclado (Comisión Europea, 2014).

Hay países como Dinamarca donde se ha conseguido que el reciclaje de residuos sea una práctica habitual, llegando a niveles de reciclaje del 90% (Gobierno de Dinamarca, 2013). No obstante, es probable que estos valores estén influenciados por la obligatoriedad de la separación de residuos y la imposición de impuestos altos sobre estos (Montecinos et al., 2006).

Otro ejemplo es Holanda, también con niveles del 90% de reciclaje (Deloitte SA., 2015). Esto se debe a que la separación en origen es obligatoria y el depósito en vertederos se carga severamente.

### 3.1. IDEAS GENERALES

Según el Plan estatal marco de gestión de residuos (PE-MAR) (2016-2022, pág 96) los residuos producidos por la construcción y demolición son gestionados por diferentes instalaciones:

- Plantas de transferencia: instalaciones para el acopio puntual de los residuos, ya que luego serán tratados en otros espacios más alejados. El objetivo de esta instalación es agrupar residuos para disminuir las tasas del transporte. En ocasiones se quiere mejorar las propiedades de los residuos que se enviarán a las plantas de tratamiento.

- Plantas de tratamiento: lugar en el que se escoje, organiza y estima los residuos para conseguir que estos sean válidos para usarlos directamente o aplicarles otro tratamiento posteriormente. En caso de no ser válidos se eliminan en vertedero. Estas plantas se encuentran fijas en un lugar o móviles.

- Plantas fijas: Se ubican en un emplazamiento con permiso de la administración donde los equipos (máquinas de trituración) son fijas. Este tipo de instalación no ejecuta faena fuera de la ubicación.

- Plantas móviles: se forman por equipos que se mueven a las obras con permiso para ello y efectúan allí el proceso de tratamiento.

- Vertederos: Son lugares donde su finalidad es la de depositar los residuos finalmente. Estos emplazamientos deben seguir la normativa que sea de aplicación incluido el Real Decreto 1481/2001 redactado el 27 de diciembre, donde se controla la exclusión de residuos.

### 3. Gestión de los residuos

Según el Plan estatal marco de gestión de residuos (PE-MAR) (2016-2022, pág 96) las pautas para elevar la propiedad del material tratado:

- Recolectar de forma independiente los componentes de los residuos y asegurar la eliminación de los peligrosos, garantizando la adecuada gestión de estos de acuerdo a la normativa aplicable.

- Promover un uso mayor de los recursos provenientes de la gestión de los residuos. Con este propósito, se pueden emplear herramientas como el incremento de los costos de disposición para desalentar la acumulación de residuos de construcción y demolición con potencial de valorización, así como la implementación de obligaciones adicionales al constructor o promotor en caso de no realizar una separación adecuada de los RCD en su origen. Esta separación correcta constituye el factor fundamental para generar un material de alta calidad que pueda reintegrarse en el mercado.

- Impulsar el aprovechamiento de recursos naturales extraídos en la construcción de estructuras terrestres como terraplenes, pedraplenes y rellenos integrales, además de su aplicación en la rehabilitación de áreas degradadas y en proyectos de acondicionamiento. Asimismo, establecer directrices medioambientales para la utilización de otros materiales provenientes del tratamiento de residuos de construcción y demolición no peligrosos en dichas aplicaciones.

## 3.2. IDEAS ESPECÍFICAS

### 3.2.1. Obras de construcción

Según el Plan estatal marco de gestión de residuos (PE-MAR) (2016-2022, pág 96) en los procesos de demolición y construcción, se generan diversos residuos peligrosos que deben ser recolectados y tratados de forma separada por gestores autorizados.

Entre los materiales y sustancias presentes en los residuos de construcción y demolición que pueden tener peligrosidad, se destacan: masillas, adhesivos y selladores (inflamables, tóxicos o irritantes), maderas tratadas con fungicidas, pesticidas, creosota, etc. (tóxicos, cancerígenos e inflamables), recubrimientos ignífugos halogenados (tóxicos, cancerígenos), alquitranes (tóxicos, cancerígenos), productos con amianto (tóxicos, cancerígenos), equipos con PCB (policloruro de bifenilo) (tóxicos, cancerígenos), luminarias de mercurio (tóxicas), sistemas con CFC (clorofluorocarbonados), elementos de yeso contaminados por sustancias peligrosas, envases que hayan contenido sustancias peligrosas (disolventes, pinturas o adhesivos), entre otros.

Es importante destacar que la normativa de residuos prohíbe expresamente la mezcla de residuos peligrosos con no peligrosos (artículo 18.2 de la Ley 22/2011). Esta mezcla no solo representa un riesgo para la salud humana, especialmente para los trabajadores de la construcción o las plantas de tratamiento de residuos, sino también para el medio ambiente. Además, conlleva la conversión de una gran cantidad de residuos no peligrosos en residuos peligrosos, lo cual implica una gestión más compleja y costosa.

Los residuos de construcción y demolición se pueden utilizar como árido reciclado en la construcción. Cuanto más a fondo se trate el desecho, mayor será la calidad del árido. Sin embargo, el árido de alta calidad es costoso y, por lo tanto, económicamente inviable en países donde el árido natural se obtiene a bajo precio.

### 3.2.2. Hormigón

El hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo, pero al mismo tiempo, no es un material respetuoso con el medio ambiente porque destruye y consume grandes cantidades de recursos naturales y también es una fuente de impacto ambiental porque después de su uso, generalmente se deposita en vertederos.

El árido de hormigón reciclado difiere del árido natural en que se compone principalmente de dos materiales, el mortero y los áridos.

Sin embargo, a menudo contiene impurezas, como ladrillos de arcilla triturados, materiales cerámicos triturados, y yeso, contribuyendo a la existencia de contaminantes, por ejemplo, cloruros, sulfatos, gel silíceo, aceite u otros nocivos materiales.

El mortero adherido, las impurezas y los contaminantes tienen una influencia negativa en las propiedades físicas, mecánicas y químicas del hormigón reciclado.

En España no existe una ley nacional que regule la evaluación ambiental de los materiales reciclados. Como resultado, los organismos medioambientales de las distintas Comunidades Autónomas son los principales responsables de regular el uso de materiales secundarios en la construcción de carreteras y otras aplicaciones de construcción.

Sin embargo, hay varias especificaciones técnicas para los materiales utilizados en la construcción. Por ejemplo, el código estructural establece las especificaciones de las estructuras de hormigón. Más concretamente, el artículo 30.8 enumera las especificaciones para reciclado agregados.

#### 4. Áridos reciclados

El reciclado de muchos residuos de construcción y demolición se enfrenta a menudo a obstáculos relacionados con dos tipos distintos de deficiencias del mercado.

El coste del daño ambiental no se internaliza en las tasas por utilización de vertederos ni en el precio del material virgen, lo que puede dar lugar a que el coste del material reciclado sea más elevado que el del material virgen.

La división de incentivos en la cadena de valor de esos residuos, donde el coste de desmantelar, separar y transformar los residuos se produce principalmente en la fase de demolición, mientras los eventuales beneficios derivados de la utilización de materiales reciclados se acumulan en la fase de producción.

Esas deficiencias del mercado, junto con las carencias existentes en las infraestructuras de gestión de residuos en un gran número de Estados miembros, impiden que se invierta en operaciones de derribo y separación, por lo que el relleno y el depósito en vertederos siguen siendo las alternativas preferidas.

Por tanto, las empresas de demolición se enfrentan a una situación de incertidumbre en cuanto a la demanda, aunque el precio de los materiales reciclados pudiera garantizar beneficios al fabricante. En algunos casos, faltan aún tecnologías que permitan que los materiales reciclados cumplan todos los requisitos técnicos, ambientales y de seguridad de los productos de construcción. Además, en ocasiones faltan también los procedimientos de certificación adecuados para garantizar que el material reciclado satisfaga todos los requisitos necesarios (Comisión Europea, 2014).

GERD (sigla en español de los escombros de construcción del país), realizó un informe para el Proyecto GEAR para la guía española de áridos reciclados, que analizó más de 60 plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición, concluyó que en España los áridos reciclados de hormigón representaban aproximadamente el 33% del total de áridos reciclados, mientras que los mixtos árido, es decir, árido reciclado con una proporción significativa de los residuos de arcilla cocida, representaron el 67% restante.

Las características del árido reciclado dependen del proceso de producción en la planta de residuos de construcción y demolición al igual que las propiedades del hormigón demolido. En consecuencia, hay diferencias importantes entre las características de los reciclados agregados producidos en diferentes plantas. De hecho, incluso los materiales de la misma planta pueden mostrar cambios de composición, dependiendo sobre las características de la fuente de demolición.

Por lo tanto, luego del análisis de investigaciones previas, se concluye que cuando se sustituye todo el árido grueso por reciclado mixto tanto la resistencia a la compresión como el módulo de la deformación disminuye: la primera entre un 25% y un 45%, y la este último entre 28% y 36%. No se han encontrado referencias con respecto ni a los valores de la relación de Poisson ni a las curvas de tensión-deformación (Isabel Martínez-Lage et al.,2012).

## ÁRIDOS RECICLADOS

Respecto a las generalidades, solo contempla el obtenido como producto de una operación de reciclado de residuos de hormigón (dejando al margen al resto de materiales) para la fabricación de hormigón reciclado, permitiéndose únicamente la utilización de árido grueso reciclado.

Para la aplicación en hormigón estructural, el código no contempla porcentajes de sustitución superiores al 20% del total de árido grueso. Para porcentajes superiores al 20% será necesario realizar estudios y experimentación, la cual aprobará la Dirección facultativa.

### 5. Código estructural

El árido grueso reciclado se puede emplear para hormigón armado siempre que la resistencia característica no supere 40 MPa. Quedan fuera del artículo:

- áridos finos reciclados
- áridos reciclados de naturaleza distinta al hormigón (mayoritariamente cerámicos)
- áridos reciclados procedentes de estructuras de hormigón con patologías que afectan a la calidad del hormigón. Los áridos gruesos reciclados obtenidos de hormigones estructurales sanos o resistencia alta sí son adecuados para hormigón reciclado estructural.

Respecto a los requisitos físico-mecánico, la absorción del árido grueso reciclado deberá ser <7% y del árido natural con el que se vaya a mezclar <4.5%.

La composición del árido grueso reciclado tiene como límite > 95% si el elemento es hormigón o material pétreo y límite > 0.5% si el material es arcilla o plásticos.

Además de la información ya citada, en hormigones con árido reciclado <20% los valores característicos del peso propio se obtienen a partir de los mismos valores de densidades, para hormigón armado 2.500 kg/m<sup>3</sup>.

En hormigones con árido reciclado >20% la densidad resultante es inferior a la de un hormigón convencional, debido al mortero que permanece adherido al árido natural. Si la sustitución del árido reciclado es total, la densidad del hormigón desciende entre el 5-15% respecto a un hormigón convencional.

Para la obtención de un hormigón de óptimas calidades es necesario que el árido reciclado proceda de hormigones de buena calidad, debido a que la calidad del hormigón de origen influye en la calidad del árido reciclado. El tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4mm.

Respecto a la granulometría de los áridos reciclados, contenido de desclasificados inferior <10% y contenido de partículas que pasan por el tamiz 4mm será <5%.

En hormigón reciclado < 20% de árido reciclado, el contenido de terrones de arcilla será <0,6%, y el del árido grueso natural al <0,15%. En el caso extremo de utilizar 100% árido grueso reciclado como máximo 0,25% de terrones de arcilla.

Áridos reciclados pueden contener impurezas y contaminantes como plástico, ladrillo y demás, causantes de un descenso de resistencia en el hormigón. Por ello, el contenido de impurezas máximo será: para material cerámico 5% del peso total de la muestra, y para plásticos 1%.

## OBJETIVOS

En la concepción inicial del trabajo se planteó como **objetivo general** estudiar el interés de si puede ser conveniente hacer un control del hormigón procedente de las demoliciones con el fin de, conociendo sus características, poder utilizarlo como árido en mayor proporción de las permitidas actualmente.

La limitación actual se debe a que no existe un control de los residuos y, por lo tanto, al emplear hormigones cuyas propiedades mecánicas se desconocen hay que limitar su uso. Si se conocieran las características del hormigón, esta limitación podría tal vez aumentarse, lo que redundaría en un mayor uso de residuos, una disminución global de contaminación del sector y, en consecuencia, en una mayor sostenibilidad.

Para dar respuesta al objetivo general planteado, la investigación se ha centrado en los siguientes **objetivos específicos**:

- Evaluar como influye la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigones de distintas calidades sobre la resistencia a compresión.
- Evaluar como influye la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigones de distintas calidades sobre la durabilidad del hormigón.

## **PLAN EXPERIMENTAL**

1. METODOLOGÍA
2. FASE 1
3. FASE 2
4. ENSAYOS
  - 4.1. Mecánicos
    - 4.1.1. Resistencia a compresión
  - 4.2. Durabilidad
    - 4.2.1. Absorción de agua, porosidad
    - 4.2.2. Carbonatación acelerada
    - 4.2.3. Migración de cloruros
    - 4.2.4. Resistividad eléctrica

## 1. METODOLOGÍA

Para poder cumplir con los objetivos establecidos, el trabajo se dividió en dos fases. En primer lugar se fabricaron hormigones de dos calidades distintas, que luego se trituraron con el fin de obtener el árido grueso que posteriormente se utilizó para la fabricación del hormigón estructural.

### **Fase1: Fabricación de hormigones de calidad controlada para la obtención del árido reciclado.**

Se fabricaron dos hormigones de diferentes dosificaciones con el fin de obtener hormigones de dos calidades distintas, uno de resistencia a compresión del orden de 18 MPa, correspondiente a hormigones habituales en las construcciones de los años 1980-2000 (acordes con las normativas EH-82, EH-88 y EH-91), y otro de resistencia a compresión del orden de 25-30 MPa, que es el más utilizado en las construcciones realizadas a partir del año 2000, con la entrada en vigor de la normativa EHE-00 que obligaba a hormigones estructurales de 25 MPa.

Una vez fabricados los hormigones, las probetas se mantuvieron en los moldes durante 48 horas cubiertas con plástico para evitar la evaporación de agua. Posteriormente, se desmoldaron y se almacenaron en una cámara de curado a 20°C y HR > 95% hasta la edad de 28 días.

Transcurrido este período, se trituraron las probetas con el fin de obtener el árido grueso reciclado. El árido se tamizó, seleccionando aquél que pasaba por el tamiz de 20 mm y quedaba retenido en el de 4 mm .

### **Fase 2: Fabricación de hormigones estructurales con árido reciclado y ensayos de caracterización.**

Se realiza cinco hormigones diferentes, uno de referencia, sin árido reciclado, y otros cuatro con diferentes porcentajes de árido reciclado procedentes de hormigones de dos calidades distintas.

Las probetas de hormigón se desmoldaron a las 48 horas y se trasladaron a una cámara de curado donde permanecieron hasta la edad de 28 días a una temperatura de 20°C y HR>95%.

Una vez finalizado el tiempo de curado, se iniciaron los ensayos de caracterización de sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión) y de durabilidad (absorción al agua, carbonatación acelerada, migración de cloruros y resistividad eléctrica).

Nota:

- Las normas EH-80, EH-82, EH-88 y EH-91 exigían una resistencia característica mínima de proyecto del hormigón de 175 kg/cm<sup>2</sup> si se utilizaba acero AEH-500 y de 150 kg/cm<sup>2</sup> si se utilizaba acero AEH-400.

- La norma EHE de 1998 establece un valor mínimo de resistencia a compresión de 25 MPa para hormigón armado.

2. FASE 1 : Fabricación de hormi-  
gones de calidad controlada para la  
obtención del árido reciclado.



Figura 1. Acopio de los diferentes tipos de áridos utilizados. Elaboración propia.



Figura 2. Acopio de los diferentes tipos de áridos utilizados. Elaboración propia.



Figura 3. Acopio de los diferentes tipos de áridos utilizados. Elaboración propia.

Para la posterior obtención de áridos reciclados se fabricaron dos hormigones de diferente calidad: uno de relación agua/cemento (a/c) igual a 0'6 y otro de relación a/c igual a 0'8.

Se fabrica en primer lugar un hormigón el cual posteriormente será el triturado para formar el árido reciclado del hormigón que efectuaremos los ensayos.

De este primer hormigón se preparan dos dosificaciones diferentes, una con la relación agua/cemento 0'6 y otra con la relación a/c: 0'8.

Se utiliza en ambos casos un cemento CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R. Las características de los áridos utilizados son arena caliza 0/4 y grava caliza 4/20. La Tabla 1 contiene las proporciones empleadas en la producción de cada variante de hormigón.

Tabla 1. Dosificaciones (Kg).

a/c	0,6	0,8
CEM II 42.5R	4.29	3.22
Agua	2.49	2.49
Arena	17.24	17.81
Grava	10.36	10.71
SP*	0.02	0.02

\**Superplastificante*

En todas las dosificaciones para la elaboración de los hormigones, se empleó el aditivo Sika ViscoCrete-20HE, el cual se caracteriza por su capacidad de superplastificación. Este aditivo cuenta con una dosificación recomendada específica para obtener los resultados deseados. 0.2 - 1% del peso del cemento.

Previo al hormigonado se estima el número de ensayos previstos y las probetas necesarias. Se busca obtener 14 litros de cada amasada para tener el árido suficiente a posteriori.



Figura 4. Análisis del contenido de humedad de arena. Elaboración propia.



Figura 5. Proceso de hormigonado. Elaboración propia.

Antes de todo hormigonado es necesario analizar el contenido de humedad de la arena para calcular la cantidad de agua necesaria en la mezcla.

Respecto al proceso de hormigonado, este consiste en las siguientes fases:

1. La preparación de los moldes necesarios, en este caso fueron cinco probetas cilíndricas para cada dosificación, en total diez probetas cilíndricas.
2. El acopio y la preparación de los materiales necesarios: arena, grava, cemento, agua y superplastificante.
3. El vertido del hormigón en los correspondientes moldes con su adecuado vibrado.

Posteriormente, se deja curar 48 horas en el laboratorio y para proteger las muestras se utilizaron telas plásticas como medida preventiva para evitar la pérdida de humedad. Pasadas las 48 horas se procede al desmoldado, referenciando las probetas, y almacenamiento en cámara de curado hasta la edad de 28 días a una temperatura constante de 20 °C y una humedad relativa superior al 95%.



Figura 6. Rotura probetas con la prensa. Elaboración propia.



Figura 7. Triturado manual. Elaboración propia.

El uso de residuos de construcción y demolición (RCD) para la fabricación de hormigón estructural

Una vez ya cumplida la edad de 28 días de las probetas y estas habiendo endurecido correctamente, se procede a romper en la prensa las probetas de hormigón. Se trituran manualmente los trozos que la prensa no es capaz de romper, para conseguir el tamaño del árido necesario.

La normativa solo admite tamaños de árido grueso, por lo que se escoje aquél que pasó por el tamiz de 20 mm y quedó retenido en el de 4 mm.

Descartamos el árido fino que pasa por el tamiz más pequeño y también descartamos los áridos grandes que no atraviesan el tamiz #20mm para que se realice una correcta adherencia de todos los materiales en el futuro hormigonado.

Este procedimiento se realiza dos veces, con las dosificaciones relación a/c: 0'6 y a/c: 0'8.

3. FASE 2: Fabricación de hormigones estructurales con árido reciclado y ensayos de caracterización.



Figura 8. Análisis del contenido de humedad de arena.  
Elaboración propia.



Figura 9. Preparación moldes.  
Elaboración propia.



Figura 10. Acopio materiales.  
Elaboración propia.



Figura 11. Hormigonado.  
Elaboración propia.

El uso de residuos de construcción y demolición (RCD) para la fabricación de hormigón estructural

Ya machacada la cantidad de hormigón de la primera fase necesario para utilizar como árido reciclado, se inicia la siguiente tanda de hormigonado. Previo al hormigonado se estima el número de ensayos previstos y las probetas necesarias. Se busca obtener 16 litros de cada amasada.

De este segundo hormigón se preparan cinco dosificaciones y cada una contiene diferentes porcentajes de árido reciclado. A pesar de que la normativa restringe el uso de árido reciclado en un máximo de 20% para hormigón estructural, en este trabajo se comprueba si varían las propiedades al aumentar el porcentaje contemplado en la norma.

Se utiliza en todos los casos un cemento de resistencia 42.5 MPa de tipo altas prestaciones CEM II/B-M (S-LL) 42.5 R. Las dosificaciones utilizadas para la fabricación de cada tipo de hormigón se recogen en la Tabla 2.

La nomenclatura empleada para designar los diferentes hormigones hace referencia a la relación a/c utilizada en los hormigones fabricados para obtener el árido reciclado (0,6 y 0,8) y al porcentaje de árido grueso reciclado utilizado (20% y 40 %).

Tabla 2. Dosificaciones de los hormigones 42,5R. (Kg/m<sup>3</sup>)

	PATRÓN	AR(0,6-20%)	AR(0,6-40%)	AR(0,8-20%)	AR(0,8-40%)
CEM 42,5	320	320	320	320	320
Agua	192,0	192,0	192,0	192,0	192,0
Árido fino	1160,85	1160,85	1160,85	1160,85	1160,85
Árido grueso	773,25	618,60	463,95	618,60	463,95
Árido reciclado	-	154,65	309,30	154,65	309,30
SP*	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
a/c	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

\*Superplastificante

Teniendo en cuenta que el contenido de humedad de los áridos es del 3,2 % y que la grava y la arena aportan un exceso de agua, se calcula la cantidad de agua que hay que incorporar directamente a la masa.

El valor de 192,0 Kg/m<sup>3</sup> es el agua que hay que incorporar suponiendo unas condiciones ideales de humedad de los áridos (saturados y superficialmente secos).



Figura 12. Muestras curando 48h con telas plásticas.  
Elaboración propia.

Posteriormente se deja curar 48 horas en el laboratorio protegiendo las muestras con telas plásticas para evitar la pérdida de humedad.

Pasadas las 48 horas se procede al desmoldado, referenciando las probetas, y almacenamiento en cámara de curado hasta la edad de 28 días.

La cámara de curado se mantiene a una temperatura constante de 20 °C y una humedad relativa superior al 95%.



Figura 13. Desmoldado probetas.  
Elaboración propia.



Figura 14. Cámara de curado.  
Elaboración propia.

## 4. ENSAYOS

### RESISTENCIA

4.1. Resistencia a compresión

### DURABILIDAD

4.2. Absorción de agua, porosidad

4.3. Carbonatación acelerada

4.4. Migración de cloruros

4.5. Resistividad eléctrica



Para poder valorar si se ven afectadas las propiedades del hormigón por contener árido reciclado en distinta dosificación, incluso superando lo contemplado en la normativa, se planifica una serie de ensayos determinantes, de tipo mecánicos y durabilidad.



Se realizan ensayos mecánicos de resistencia a compresión en ambas fases de hormigonado, la fase 1 consiste en dos hormigones de relación agua/cemento 0'6 y 0'8. La fase 2 consiste en triturar el hormigón de la fase 1 y añadirlo en un porcentaje variable del 20% y del 40%.



Desde el punto de vista de la durabilidad se realizan ensayos que permiten obtener indicadores indirectos de durabilidad, como son migración de cloruros, carbonatación acelerada, absorción de agua (porosidad) y resistividad eléctrica.



Figura 15. Partición probetas.  
Elaboración propia.

## 4.1. Resistencia a compresión



Figura 16. Ensayo de resistencia Fase 1. Elaboración propia.

Previo al ensayo, tal y como indica la norma, se deben pulir las superficies que van a recibir la carga para regularizarlas y evitar así fallos en los resultados.

El ensayo siguió los parámetros de la norma UNE-EN 12390-3 y se realizó con la prensa modelo Ibertest MEH-1500SW.

Este ensayo consiste en cargar las probetas a compresión hasta llegar a la rotura.

En este primer ensayo se someten a carga de compresión las probetas de calidad relación a/c 0'6 y 0'8.

Con las probetas de relación a/c 0'6 se produjo la rotura con una resistencia de 30 MPa y una fuerza de 240 KN.

Con las probetas de relación a/c 0'8 se produjo la rotura para la resistencia de 18 MPa y la fuerza de 140 KN. Se corresponde a lo esperado en un principio.

En este segundo ensayo se comprueba la rotura frente a compresión en cinco tipos de hormigón de distinta calidad.

Tabla 3. Resistencia de las probetas de Fase 1.

a/c	R(MPa)	F(KN)
0,6	30	240
0,8	18	140



Figura 17. Ensayo de resistencia Fase 2. Elaboración propia.

## 4.2. Absorción de agua, porosidad



Los valores de porosidad se obtuvieron siguiendo las especificaciones de la norma española UNE-EN 83980.

El ensayo consiste en el análisis de la variación de pesos que sufren las probetas al someterlas a la penetración de agua mediante vacío y saturación.



Previo al ensayo, se secan las probetas en estufa a alta temperatura ( $105^{\circ}$ ) durante 24h. De este proceso se obtiene el peso seco.

Posteriormente, las probetas fueron sumergidas durante 72 horas en agua y secadas en vacío. Pasadas dos horas en estas condiciones, se llenó la cámara de vacío con agua hasta que quedó el nivel 20 mm por encima de las probetas.



Esto se mantuvo durante 24 horas y tras este periodo, se extrajeron las probetas, determinando el peso hidrostático y el peso saturado.



Figura 18. Ensayo de porosidad.  
Elaboración propia.

### 4.3. Carbonatación acelerada



El análisis de la resistencia a la carbonatación del hormi-  
gón se llevo a cabo siguiendo la normativa UNE 83993-2.

Consiste en almacenar las probetas en una cámara de  
carbonatación, con el previo acondicionamiento, durante  
14 días con una concentración de CO<sub>2</sub> cien veces supe-  
rior al de la atmosfera, del orden del 3% (mientras que en  
la atmósfera es del 0,03%).

Pasado el tiempo de exposición se procede a la rotura de  
las probetas mediante tracción indirecta. Sobre el plano  
de rotura se roció una disolución de fenolftaleína, al 1%  
disuelto en alcohol etílico al 70%, para determinar el fren-  
te de avance.

El frente no teñido de color indica la profundidad de pene-  
tración del frente carbonatado.



Figura 19. Ensayo de carbonata-  
ción.



Figura 20. Ensayo de carbonata-  
ción.



Figura 21. Ensayo de carbonata-  
ción.

#### 4.4. Migración de cloruros



Figura 22. Ensayo de cloruros.  
Elaboración propia.

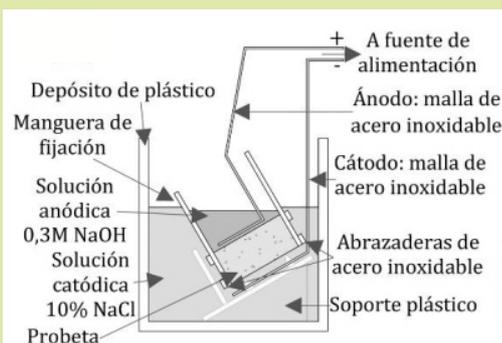


Figura 23. (Lliso, 2022)

El ensayo de migración de cloruros permite conocer la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros. Este se realizó siguiendo la norma NT-BUILD 492. Esta normativa específica que hay que sellar la cara lateral curva de las probetas con resina epoxi para evitar que haya fugas.

Previamente al ensayo se acondicionaron las probetas, tal y como indica la normativa, saturadas en vacío con una disolución de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ ) durante 24 horas.

Una vez ya realizado el acondicionamiento, se colocaron en la celda de ensayo con una de las caras en contacto con la disolución de dos molar de cloruros ( $2\text{M NaCl}$ ) y la otra cara en contacto con la disolución de  $0,3$  molar de hidróxido de sodio ( $0,3\text{M NaOH}$ ). Se aplicó una diferencia de potencial para forzar el paso de los cloruros.

El valor del potencial y el tiempo que tiene que estar aplicado se establece según normativa. (Table 1. NT BUILD 492) En este caso como el potencial inicial con  $30\text{V}$  estaba entre  $60-90$ , se aplicó un voltaje de  $25\text{V}$  durante  $24\text{h}$ .

Para cada tipo de hormigón se analizaron tres probetas, siendo la media aritmética de cada uno el resultado obtenido por el ensayo.

Para la obtención del valor de profundidad de penetración de los cloruros en  $\text{mm}$  ( $X_d$ ) se realizaron los siguientes pasos; se obtuvo a partir de dejar secar las probetas durante 24 horas y abiertas mediante tracción indirecta.

El revelado del avance de los cloruros se obtuvo pulverizando las muestras con una disolución de nitrato de plata  $0,1\text{M}$  ( $0,1\text{M AgNO}_3$ ). La zona más blanquecina revela el frente de penetración de los cloruros en el hormigón.

## 4.5. Resistividad eléctrica



Figura 24. Ensayo de carbonatación. Elaboración propia.



Figura 25. Ensayo de carbonatación.

La resistividad eléctrica se determinó siguiendo la norma española UNE-EN 83988, mediante el método directo. El acondicionamiento de las probetas se realizó a los 28 días de edad. Se saturaron las muestras con agua tras estar en vacío por varias horas y se mantuvo esta situación durante 24 horas.

La resistencia eléctrica se determinó mediante el método directo, aplicando un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de la probeta. Los dos extremos de la probeta se cortaron con el fin de eliminar la capa superficial de hormigón en la zona donde se colocan los electrodos. Esto se hizo porque esta capa es más rica en cemento que el resto de la probeta debido al efecto pared que se produce durante el hormigonado (casting) en las zonas en contacto con el encofrado.

Las medidas se tomaron con un conductímetro comercial (Portavo 904).

El inverso de la conductancia es la resistencia eléctrica del material. Se utilizaron dos electrodos planos de acero inoxidable de 100 x 100 mm. Para asegurar un buen contacto eléctrico entre la probeta y los electrodos, se introdujeron unas esponjas de la misma superficie que los electrodos, que se humedecieron previamente. Para que la presión aplicada sobre los electrodos fuese homogénea, se utilizaron unas prensas construidas con dos placas de nailon y unas varillas metálicas. El valor se registró a los 5 minutos de haber iniciado la medida para asegurar que la señal registrada fuese suficientemente estable.

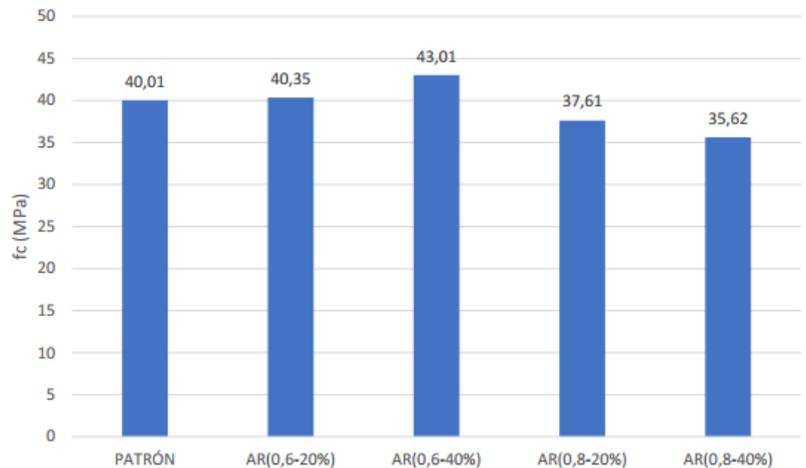
## **RESULTADOS**

1. Resistencia a compresión
2. Absorción de agua, porosidad
3. Carbonatación acelerada
4. Migración de cloruros
5. Resistividad eléctrica

## Resistencia a compresión

Tabla 4. Ensayo resistencia a compresión (MPa).

Hormigón	Probeta 1	Probeta 2	Media
Patrón	40,71	39,31	40,01
AR(0,6-20%)	40,79	39,92	40,35
AR(0,6-40%)	41,49	44,53	43,01
AR(0,8-20%)	33,27	41,96	37,61
AR(0,8-40%)	37,65	33,60	35,62



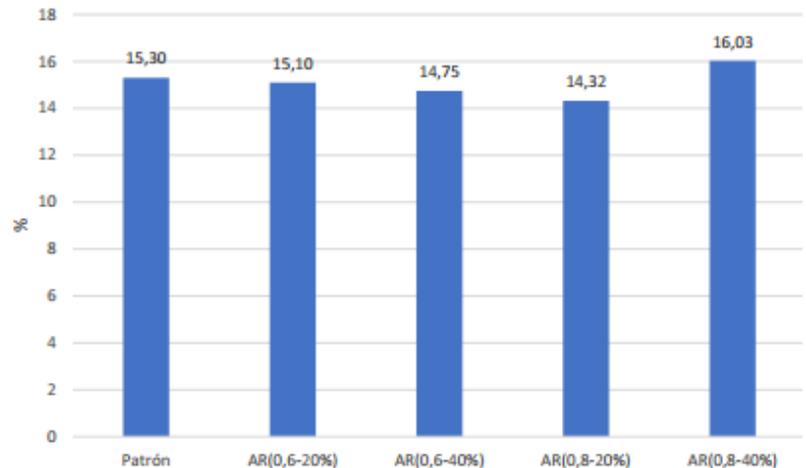
Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 30 MPa (AR(0,6)) y se sustituye el 20% no varía la capacidad resistente. Lo mismo ocurre cuando se sustituye el 40%, no se ve afectada la resistencia.

Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 18 MPa (AR(0,8)) y se sustituye el 20% se observa una pérdida de resistencia del 6%, que puede considerarse poco significativa, pues está dentro de los márgenes de error propios del ensayo. No obstante, cuando la sustitución es del 40%, la pérdida de resistencia ya es superior al 10% y, por lo tanto, ya no es despreciable.

## Absorción agua

Tabla 5. Ensayo de absorción de agua (%).

Hormigón	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Media
Patrón	15,17	15,07	15,21	15,38	15,68	15,30
AR(0,6-20%)	15,09	14,85	15,29	14,94	15,34	15,10
AR(0,6-40%)	14,69	14,41	14,57	14,90	15,18	14,75
AR(0,8-20%)	14,60	13,92	14,31	14,34	14,43	14,32
AR(0,8-40%)	15,77	16,17	15,89	16,03	16,30	16,03



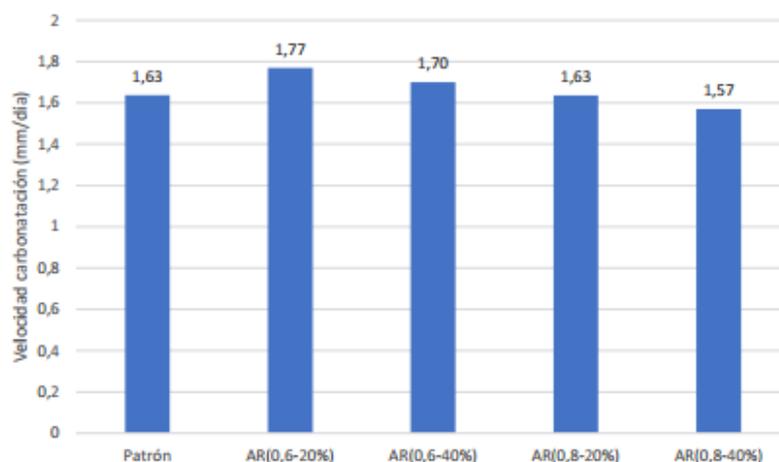
Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 30 MPa (AR(0,6)) y se sustituye el 20% no varía la absorción de agua. Lo mismo ocurre cuando se sustituye el 40%, esta absorción varía tan poco que no se ve afectada.

Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 18 MPa (AR(0,8)) y se sustituye el 20% disminuye la absorción de cantidad de agua. Con la sustitución del 40% se observa un aumento en la absorción, pero al ser una diferencia tan baja, del 4,8 % se considera en el mismo rango.

## Carbonatación acelerada

Tabla 6. Ensayo carbonatación acelerada (mm/día).

Hormigón	Penetración (mm)	Coefficiente K (mm/día)
Patrón	6,12	1,63
AR(0,6-20%)	6,62	1,77
AR(0,6-40%)	6,37	1,70
AR(0,8-20%)	6,12	1,63
AR(0,8-40%)	5,87	1,57



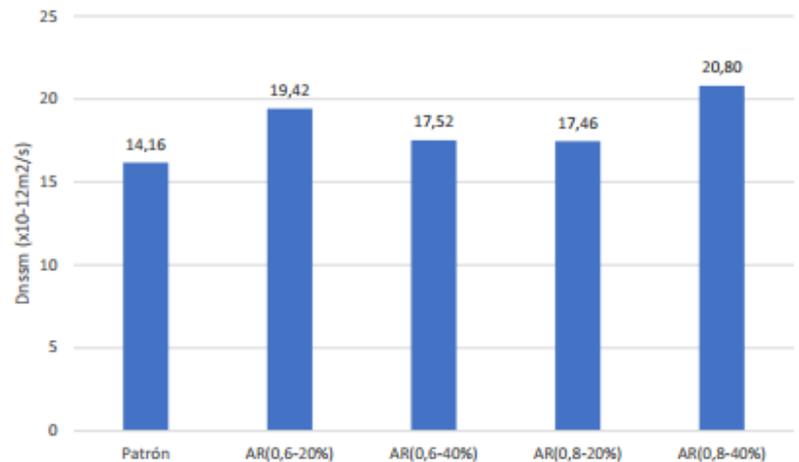
Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 30 MPa (AR(0,6)) y se sustituye el 20% es el caso más desfavorable de este ensayo, y aún así, el aumento de la velocidad de carbonatación es del 8,6 %, lo que podemos considerar que esta en el mismo rango. Lo mismo ocurre cuando se sustituye el 40%, esta carbonatación varía tan poco que no se ve afectada.

Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 18 MPa (AR(0,8)) y se sustituye el 20% no varía en absoluto la carbonatación del hormigón. Con la sustitución del 40% se observa una disminución de la velocidad, pero al ser una diferencia tan baja se considera en el mismo rango.

## Migración de cloruros

Tabla 7. Ensayo migración de cloruros ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ).

Hormigón	$D_{nssm}$ ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )
Patrón	14,16
AR(0,6-20%)	19,42
AR(0,6-40%)	17,52
AR(0,8-20%)	17,46
AR(0,8-40%)	20,80



El parámetro  $D_{nssm}$  se obtiene de la siguiente ecuación:

donde se tiene en cuenta la temperatura (T), la duración del ensayo (t), espesor de la probeta en mm (L) y el voltaje aplicado en Voltios (U).

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 \cdot T \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{T \cdot L \cdot x_d}{(U - 2)}} \right) \quad 2.4$$

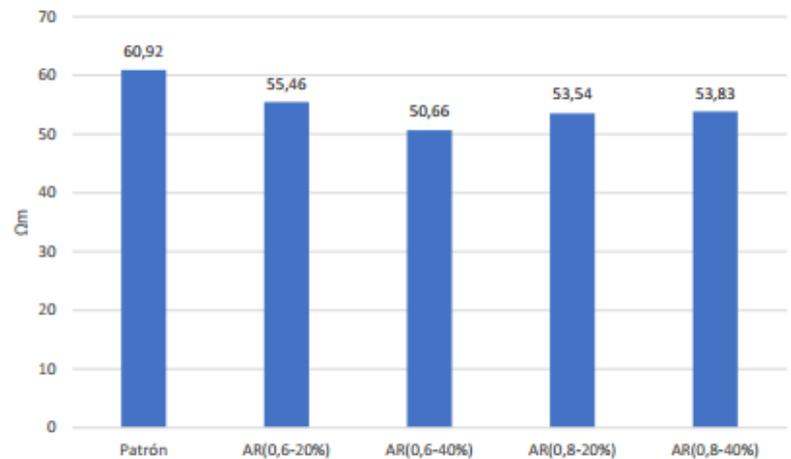
Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 30 MPa (AR(0,6)) y se sustituye el 20% varía la migración de cloruros en un 37,15% respecto del patrón. Cuando se sustituye el 40%, esta migración se ve afectada en un 27,72%.

Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 18 MPa (AR(0,8)) y se sustituye el 20% podemos considerar que varía un 23,30%. Con la sustitución del 40% se observa un aumento en la migración de cloruros del 46,89%. No se puede despreciar esta diferencia en ninguno de los casos.

## Resistividad eléctrica

Tabla 8. Ensayo resistividad eléctrica ( $\Omega m$ ).

Hormigón	$\Omega m$ 1	$\Omega m$ 2	$\Omega m$ Media
Patrón	60,13	61,72	60,92
AR(0,6-20%)	54,85	56,08	55,46
AR(0,6-40%)	50,35	50,96	50,66
AR(0,8-20%)	52,32	54,76	53,54
AR(0,8-40%)	53,02	54,64	53,83



La medida de la resistividad resulta también de interés en los estudios de caracterización no destructivos del hormigón. Refleja la capacidad del material de transportar carga eléctrica. La corrosión de las armaduras es un proceso electroquímico en el que además del transporte de electrones a través del acero debe haber una corriente iónica que permita cerrar el circuito eléctrico. Así pues, una vez despasivada la armadura, la resistividad del hormigón controla la cinética de los procesos de corrosión.

Resistividad ( $K \Omega.cm$ )	Riesgo corrosión
$p > 200$	poco
$200 > p > 10$	moderado
$p < 10$	alto

Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 30 MPa (AR(0,6)) y se sustituye el 20% no varía la resistividad eléctrica. En cambio, cuando se sustituye el 40% se observa una disminución de la resistividad eléctrica, siendo el peor caso de este ensayo. Aunque las diferencias entre el patrón y el peor de los casos sea del 17% realmente no afecta mucho, porque el riesgo de corrosión que puedan tener las armaduras no varía

Cuando el árido reciclado procede de un hormigón ordinario de resistencia del orden de 18 MPa (AR(0,8)) y se sustituye el 20% casi no varía la resistividad del hormigón. Con la sustitución del 40% al ser una diferencia tan baja se considera en el mismo rango.

## CONCLUSIONES

En base al plan experimental realizado en el presente trabajo y a los resultados obtenidos, se muestran a continuación las principales conclusiones generales a las que se ha llegado:

Respecto al ensayo de resistencia a compresión desde el punto de vista mecánico, dependiendo del origen del árido reciclado, es posible admitir porcentajes de árido reciclado superiores al 20% que establece la normativa española o el Eurocódigo 2. Así, cuando el árido reciclado procede de hormigones de igual resistencia a la del hormigón que se quiere fabricar es admisible sustituciones de árido por árido reciclado del 40%. Sin embargo, cuando se utiliza árido procedente de un hormigón de 18 MPa para la fabricación de un hormigón de 25-30 MPa, ya no es conveniente superar el porcentaje del 20% .

Respecto al ensayo de absorción de agua, porosida, como conclusión parece viable la utilización de áridos reciclados procedentes de un hormigón de 18 MPa para la fabricación de un hormigón estructural HA-25, pues el incremento de absorción en el hormigón AR(0,8-40%) es tan solo de un 4,8% respecto del hormigón patrón. No influye la cantidad de áridos reciclados ni la calidad de estos.

Respecto al ensayo de carbonatación acelerada no se ve afectada la durabilidad por contener árido reciclado, no hay diferencia en la utilización de árido reciclado o no desde el punto de vista de la carbonatación. en ambientes no marinos se puede sustituir más del 40%.

Se imagina que hay una estructura donde el recubrimiento es 50 mm, cogiendo como ejemplo la probeta de 0'8 y porcentaje 20%, despejando la incógnita del tiempo, sabemos que tardaría en llegar a la armadura 933 días.

Respecto al ensayo de migración de cloruros se puede concluir que no es conveniente la sustitución de árido reciclado, sea de mejor calidad o no, e independientemente de la proporción, ya que en cualquier caso la diferencia en los resultados son superiores al 20%, por lo que no es conveniente en ambientes marinos ni siquiera sustituciones del 20%, es incluso excesiva la normativa.

Respecto al ensayo de resistividad eléctrica los valores se mantienen en el mismo rango independientemente de si contienen árido reciclado en mayor o menor calidad. Se puede concluir que no hay diferencia en la utilización de árido reciclado o no desde el punto de vista de la resistividad eléctrica, ya que, aunque la diferencia entre el patrón y el peor de los casos (AR(0,6-40%)) sea del 17%, el riesgo de corrosión que puedan tener las armaduras no varía.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Comisión Europea (2014). Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción.
2. Comisión Europea (2020). Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Nuevo plan de acción para la economía circular.
3. de Brito, J., & Silva, R. (2016). Current status on the use of recycled aggregates in concrete: Where do we go from here?. RILEM Technical Letters, 1, 1-5.
4. Diario Oficial de la Unión Europea. DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (Texto pertinente a efectos del EEE).
5. European Commission. (2011) ENV.G.4/FRA/2008/0112. Service contract on management of construction and demolition waste – SR1. Final Report Task 2.
6. Lliso, J. (2022). Monitorización de la durabilidad de estructuras existentes de hormigón armado mediante la inserción de una red de sensores. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia
7. Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. Construction and Building Materials, 25(2), 742-748.
8. Martínez-Lage, I., Martínez-Abella, F., Vázquez-Herero, C., & Pérez-Ordóñez, J. L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. Construction and Building Materials, 37, 171-176.
9. Ministerio de Fomento. EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. In: Ministerio de Fomento Normativa de edificación; 2008.
10. Mália, M., De Brito, J., Pinheiro, M. D., & Bravo, M. (2013). Construction and demolition waste indicators. Waste Management & Research, 31(3), 241-255.
11. NT BUILD 492. Nordtest Method (1999).

12. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PE-MAR) (2016-2022). Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente.
13. Pérez, P. (2019) Influencia de la corrosión de las armaduras sobre la adherencia acero-Hormigón en estructuras. Trabajo final de máster.
14. Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación.
15. Rodríguez, C., Parra, C., Casado, G., Miñano, I., Albadalejo, F., Benito, F., Sánchez, I. (2016). The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete pieces. *Journal of Cleaner Production*, 127, 152-161.
16. Rodríguez, G., Medina, C., Alegre, F. J., Asensio, E., & De Rojas, M. S. (2015). Assessment of construction and demolition waste plant management in Spain: in pursuit of sustainability and eco-efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 90, 16-24.
17. UNE 112011. Norma española (2011).
18. UNE 83980. Norma española. (2014).
19. UNE 83988-1. Norma española. (2008).
20. UNE-EN 12390-3. Norma española (2020).
21. Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C., Skoczylas, F., & Corvez, D. (2014). Cement and concrete research. *Journal of Cleaner Production*, 55, 1-13.
22. Rodríguez, C. (2019). Los residuos de construcción y demolición (RCD) y las escorias de central térmica como áridos para la elaboración de hormigones y prefabricados no estructurales. Estudio en laboratorio y aplicación industrial. [Tesis doctoral].