



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado:
Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino**

Tesis Doctoral
Vivian Andrea Ulloa Mayorga

Directores:
Pedro Serna Ros
María José Pelufo Carbonell

Valencia, 2012



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

Departamento de Ingeniería de la Construcción y
de Proyectos de Ingeniería Civil

Doctorado en Ingeniería de la Construcción y Gestión Ambiental

**Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado:
Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino**

Tesis Doctoral

Autora:

Vivian Andrea Ulloa Mayorga

Directores:

Pedro Serna Ros

María José Pelufo Carbonell

Valencia, 2012

Vivian Andrea Ulloa Mayorga
ICITECH, Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil
Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España
e-mail: viulma@upvnet.upv.es
andrea.ulloam@gmail.com

*A mis padres Leonor y Fernando
por su constancia, su ejemplo, su apoyo y su cariño que traspasa fronteras
por darme la herramienta más importante para la vida: el amor*

*a mis hermanos Lorena y Camilo
por sus palabras, sus consejos, su compañía
por crecer y seguir creciendo a mi lado*

*a Little Segas Ulloa
porque representa la prolongación de nuestra existencia.*

La felicidad no está en hacer lo que uno quiere, sino en querer lo que uno hace

J. Sartre

Agradecimientos

Esta tesis es resultado de una sinergia de esfuerzos de diversa índole y por ello quiero agradecer:

A mis directores, Pedro Serna Ros y María José Pelufo Carbonell por guiarme a lo largo de este trabajo, por transmitirme sus conocimientos y experiencias, por su respaldo, su dedicación y sus acertados consejos científicos, técnicos y hasta lingüísticos.

A Alberto Domingo, por quien empecé esta relación intensa con el hormigón con áridos reciclados, por darme la oportunidad de trabajar en el proyecto RECNHOR y CLEAM.

A Joaquín Catala por su apoyo incondicional, sus consejos académicos y personales, y por introducirme en el mundo de los áridos reciclados.

A los Grupos de trabajo RECNHOR, CLEAM y GEAR por sus enriquecedoras reuniones para el intercambio de experiencias e investigaciones, con quienes me introduje en la ciencia del hormigón con áridos reciclados y sus aplicaciones.

A Mercedes Bonilla Salvador por su apoyo y su colaboración incondicional para que surgiera la química entre el hormigón armado y yo. Y a todo el grupo de química de los materiales del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de València, en especial a Lourdes Soriano y Erich Rodríguez por sus consejos, su disposición y su apoyo más que microestructural.

A Marilda Barra, Diego Aponte y Enric Vazquez del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya y a Amparo Moragues del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Politècnica de Madrid, por sus conocimientos, su apoyo, sus comentarios, su disposición y por toda su colaboración.

A Needy Vergara por su compañía en el aprendizaje y porque logramos fabricar hormigón con las especificaciones proyectadas sin morir en el intento.

A todos los miembros del Departamento de Ingeniería de la Construcción y del Instituto de Ciencia y tecnología del Hormigón ICITECH, de la Universitat Politècnica de València por hacer posibles horas de trabajo alrededor del hormigón. A Paco y Jorge por sus ideas, su fuerza y su disposición para el trabajo que implica una tesis experimental en hormigón.

A Carlos Hidalgo, Ángel y Manolo del Departamento de Ingeniería del Terreno, de la Universitat Politècnica de València por sus ideas, su colaboración y su disposición.

A Gerssy Peñaloza y Yezid Alvarado por su amistad y su cariño infinitos, por ser mi familia en Valencia, por ser un refugio y una luz cuando perdía el norte, por su apoyo y su compañía a lo largo y ancho de este camino.

A Maritza Meneses por su saludo cada mañana y tantas historias, a Conxi Tolosa por una convivencia fraternal, a Marisol Londoño por las experiencias y charlas sin fin, a Benjamín Torres por su cariño, apoyo y compañía cada día en el despacho.

A mis amigas y amigos con quienes he compartido historias con o sin áridos reciclados de por medio, pero que manifestaron siempre su interés por mi querida tesis:

A Paulo, Mauro, Erich, Diego, Lourdes, Isabel, Ester, Francisco, Margareth, Catalina, Héctor, Johana, Leonardo, Needy, Gloria, Felipe, Elkin, Lucho, Jorge, Larisa, Linda, Teto, Jose, Luis, Clara, Alfredo, Alejandra, Rosana, Esther, Estefanía, Emilio, Esteban, Jesús, Andrés, a los que se me escapan ahora de la memoria y a los que ya no están, mil gracias por su cariño, su compañía, su apoyo, sus consejos, su animo, por las comidas dentro y fuera del laboratorio, por el café, el abrazo en medio del alma, por hacer latir con fuerza mi corazón con tantas historias, en fin por los momentos compartidos al calor de un algo que también hicieron parte de esta experiencia de vida llamada tesis doctoral y que resumo ahora en más de 300 páginas hablando de hormigón reciclado.

Resumen

Esta tesis es una contribución al conocimiento y la investigación sobre la durabilidad de hormigones con árido reciclado en un ambiente marino como aporte científico y soporte para la elaboración de recomendaciones sobre el uso de este material.

La industria de la construcción extrae recursos naturales y deposita residuos de construcción y demolición en grandes cantidades, lo cual tiene implicaciones ambientales y económicas que no se consideran sostenibles. Por ello los gobiernos intentan promover políticas y recomendaciones destinadas a reducir el uso de los recursos primarios y al aumento de la reutilización y el reciclaje.

El interés en el uso de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) está en continuo crecimiento debido a su potencial frente a diversos usos, entre ellos su utilización como árido en la fabricación de nuevos hormigones, siendo ambientalmente responsable, tecnológicamente válido y económicamente viable.

La utilización de árido reciclado de RCD en la producción de hormigón estructural puede afectar su comportamiento frente a propiedades mecánicas y de durabilidad debido a las características particulares del árido como su alta absorción.

En el desarrollo de este trabajo se evaluó el comportamiento mecánico y la durabilidad frente a un ambiente marino, para un hormigón estructural con distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado grueso (0%, 20%, 50% y 100%) y dos relaciones agua efectiva cemento (a_{ef}/c) 0,45 y 0,50 mantenidas a lo largo de la investigación, analizando los mecanismos de transporte que permiten el ingreso y movimiento de los cloruros en el hormigón hasta la armadura, que pueden generar la corrosión de armaduras, catalogada como la causa de daño que más afecta a las estructuras de hormigón.

Para el desarrollo de esta tesis fueron empleados áridos reciclados producidos en plantas de gestión de residuos españolas. En una primera etapa que corresponde a

los estudios previos, fueron determinadas las características de cinco áridos reciclados de distinta procedencia, del tipo reciclado de hormigón (ArH) y su influencia en la variabilidad de la resistencia a compresión del hormigón. Además un árido reciclado de tipo mixto de hormigón (ArMh) fue analizado para la evaluación de la resistencia a la penetración de cloruros. El procedimiento de fabricación y el estado en que los áridos eran introducidos a la mezcla fue evaluado debido a su gran influencia sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Posteriormente se llevaron a cabo los ensayos de caracterización de los hormigones, determinando sus propiedades físicas y mecánicas, frente a resistencia a Compresión resistencia a tracción indirecta y módulo de elasticidad. Se examinó además la interfase que presenta su microestructura por microscopía electrónica de barrido (SEM) para entender el fenómeno de la zona de transición o interface del árido reciclado con la pasta de hormigón.

Se evaluó la durabilidad del hormigón frente a la corrosión de armaduras en un ambiente marino, para lo cual fueron evaluados los mecanismos de transporte de agentes agresivos a través del hormigón. Ensayos de porosidad, permeabilidad, succión capilar y difusión fueron llevados a cabo para analizar la penetración de cloruros en el hormigón con áridos reciclado. El ingreso de los cloruros, fue analizado por difusión natural y migración, determinando para los dos casos el coeficiente de difusión "D".

En el análisis de difusión natural, se obtuvo el perfil del contenido de cloruros a distintas profundidades, sobre las probetas de hormigón armado expuestas al ambiente marino, con agua de mar artificial, tras más de un año de exposición. Mientras que para los ensayos de migración, se determinó el coeficiente de difusión "D" en estado estacionario y no estacionario, a distintas edades (7, 30 y 365 días), para hormigones conservados en cámara húmeda (20°C y 100% humedad relativa) hasta el momento del ensayo. Para estimar el potencial de corrosión y la intensidad de corrosión fueron tomadas lecturas con el corrosímetro GECOR6 sobre probetas de hormigón armado expuestas a un ambiente marino a lo largo de la investigación.

Los resultados muestran que con áridos reciclados se puede obtener un hormigón durable. El tipo y dosificación de árido reciclado tiene gran influencia sobre las propiedades del hormigón obtenido. Con el cemento resistente al agua de mar se han alcanzado resultados aceptables para los hormigones reciclados, incluso con

contenidos elevados de árido reciclado procedente de hormigón, siempre que la relación a_{ef}/c cumpla los requisitos planteados por los códigos de buenas prácticas. Las limitaciones planteadas por el anejo 15 de la EHE se han mostrado altamente conservadoras.

Como conclusión se ha encontrado que el hormigón con áridos reciclados gruesos procedentes de hormigón es viable para uso estructural frente a solicitaciones mecánicas y de durabilidad y que actualmente en el mercado español se pueden encontrar áridos reciclados de hormigón con la calidad requerida para la fabricación de hormigones estructurales.

Resum

Aquesta tesi és una contribució al coneixement i la investigació sobre la durabilitat de formigons amb àrid reciclat en un ambient marí com a aportació científica per l'elaboració de recomanacions sobre l'ús d'aquest material.

La indústria de la construcció extrau recursos naturals i diposita residus de construcció i demolició en grans quantitats, cosa que té implicacions ambientals i econòmiques que no són considerades sostenibles.

L'interès a utilitzar àrids reciclats procedents dels residus de construcció i demolició (RCD) està en creixement continu a tot el món degut al seu potencial front a diversos usos, entre ells la seua utilització com àrid per la fabricació de nous formigons, sent ambientalment responsable, tecnològicament vàlid i econòmicament viable. Les polítiques ambientals dirigeixen als governs cap a la promoció de recomanacions destinades a reduir l'ús dels recursos primers i a l'augment de la reutilització i el reciclatge.

La utilització d'àrid reciclat de RCD per la producció de formigó estructural pot afectar el seu comportament en termes de propietats mecàniques i de durabilitat a conseqüència de les característiques particulars de l'àrid, com la seua elevada absorció.

Al llarg del desenvolupament d'aquest treball s'ha evaluat el comportament mecànic i la durabilitat enfront d'un ambient marí, per un formigó estructural amb diferents percentatges de substitució d'àrid reciclat gros (0%, 20%, 50% i 100%) i dues relacions aigua/cement (a_{ef}/c) 0,45 i 0.50 mantingudes al llarg de la investigació, analitzant els mecanismes de transport que permet l'ingrés i moviment dels clorurs al formigó fins a l'armadura, que poden generar-ne la corrosió, catalogada com la causa de patologia que més afecta les estructures de formigó.

Per al desenvolupament d'aquesta tesis han sigut utilitzats àrids reciclats produïts a plantes de gestió de residus espanyoles. En una primera etapa que correspon als

estudis previs, es van determinar les característiques de cinc àrids reciclats de distinta procedència, del tipus reciclat de formigó (ArH), i la seua influència en la variabilitat de la resistència a compressió del formigó. A més a més, un àrid reciclat de tipus mixt de formigó (ArMh) ha sigut analitzat per l'evaluació de la resistència a la penetració de clorurs. El procediment de fabricació i l'estat en què els àrids eren introduïts a la mescla han sigut evaluats degut a la seua gran influència sobre les propietats del formigó reciclat.

Posteriorment, s'han dut a terme els assajos de caracterització dels formigons, determinant-ne les propietats físiques i mecàniques, en termes de resistència a compressió, resistència a tracció indirecta i mòdul d'elasticitat. S'ha examinat també la interfase que presenta la seua microestructura per mitjà de microscòpia electrònica de rastreig (SEM) per tal d'entendre el fenomen de la zona de transició o interfase de l'àrid reciclat amb la pasta de formigó.

S'ha evaluat la durabilitat del formigó en termes de la corrosió d'armadures en un ambient marí, per a la qual cosa s'han evaluat els mecanismes de transport d'agents agressius a través del formigó. Assajos de porositat, permeabilitat, succió capil·lar i difusió han sigut duts a terme per analitzar la penetració de clorurs al formigó amb àrids reciclats. L'ingrés dels clorurs ha sigut analitzat per difusió natural i migració, determinant-ne per ambdós casos el coeficient de difusió "D".

A l'anàlisi de difusió natural, s'ha obtès el perfil del contingut en clorurs a diferents profunditats, sobre les provetes de formigó armat exposades a l'ambient marí, amb aigua de mar artificial, després de més d'un any d'exposició. Mentre que per als assajos de migració s'ha determinat el coeficient de difusió "D" en estat estacionari i no estacionari, a diferents edats (7, 30 i 365 dies), per a formigons conservats en càmera d'humetat (20°C i 100% d'humitat relativa) fins el moment de l'assaig. Per tal d'estimar la potència de corrosió E_{corr} i la intensitat de corrosió I_{corr} s'han pres lectures amb el corrosímetre GECOR6 sobre provetes de formigó armat exposades a l'ambient marí al llarg de la investigació.

L'ús de materials adequats permet obtenir un formigó durable, el tipus d'àrid reciclat té gran influència sobre les propietats del formigó de la mateixa manera que la quantitat i el tipus de cement tenen un paper important. Amb el cement resistent a l'aigua de mar s'han obtès resultats acceptables per als formigons reciclats, i per això efectivament als formigons amb àrid reciclat la matriu de pasta

de cement és determinant i per tant la relació a/c i el tipus de cement són factors significatius en les seues propietats de durabilitat i també en el tipus d'aplicació.

S'ha detectat que el formigó amb àrids reciclats grossos procedents de formigó és viable per l'ús estructural sota sol·licitacions mecàniques i de durabilitat i que actualment al mercat espanyol es poden trobar àrids reciclats de formigó amb la qualitat requerida per la fabricació de formigons de fins els 40MPa.

Abstract

This thesis is a contribution to knowledge and research on the durability of recycled aggregate concrete in a marine environment as a scientific contribution to the development of recommendations on the use of this material.

The construction industry is currently using natural resources and disposing construction and demolition wastes in very large quantities; these practices have environmental and economic implications that are not longer considered sustainable.

Interest in the use of recycled aggregates from construction and demolition waste (C&D) is continuously growing worldwide due to its potential against a variety of uses, including its use as an aggregate in new concrete manufacturing, being environmentally responsible, technologically available and economically feasible. Although it is environmentally beneficial to use recycled aggregates, the current specifications and experience in many parts of the world are not able to support and encourage the recycling of C&D waste. However, many governments are now promoting policies aimed at reducing the use of primary resources and increasing reuse and recycling.

The use of recycled concrete aggregate on the production of structural concrete may decrease its performance respect to mechanical properties and durability due to its particular characteristics, such as, the high water absorption of this aggregate.

Durability is an important property; and recycled aggregates need to be widely tested to prove its efficiency, in order to gain confidence of its use within the industry. It is generally accepted that corrosion is the most common cause of concrete deterioration and this work shows further possibilities in this field.

The approach adopted in this research includes a large substitution of natural coarse aggregates by recycled concrete aggregates and its suitability in a reinforced concrete application. The mechanical behaviour and durability against a marine environment for structural concrete made with 0%, 20%, 50% and 100%

of recycled coarse aggregates and two effective water cement ratio (w_{ef}/c) 0,45 and 0,50 have been assessed and evaluated. Taking into account that corrosion is the principal problem of durability in reinforced concrete, the deterioration mechanisms of concrete permeation properties, such as, permeability, sorptivity, and diffusion for chloride ingress, were analysed.

Commercially produced coarse recycled aggregate manufactured in Spain were used in the development of this thesis. Throughout the preliminary studies, the characteristics of five different sources of recycled aggregates, the concrete recycling rate (ArH) and its influence on the variability of the compressive strength of concrete were determined. Furthermore, a recycled aggregate concrete mixed type (ARMH) was analyzed to evaluate the resistance to penetration of chlorides. The manufacturing method and the influence of moisture states of recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete were also evaluated considering its great influence on the properties of recycled concrete.

Subsequently, characterization tests of concrete were carried out to determine its physical and mechanical properties. All aggregates were used at air-dried condition. The compressive and splitting tensile strength and Modulus of elasticity of the concrete were tested, and the microstructure of the concrete was analysed by Scanning electron microscopy (SEM) to examine the Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone (ITZ). The durability properties such as porosity, permeability, capillary absorption and chloride ion penetration for the concrete mixtures were also determined.

The durability of concrete against corrosion of reinforcement in a marine environment was evaluated through the transport mechanisms for aggressive agents through the concrete. Tests of porosity, permeability, capillary suction and diffusion were carried out to analyse the chloride penetration into concrete recycled aggregates. The penetration of chloride was analysed by migration and natural diffusion, determining in both cases the diffusion coefficient "D".

In the analysis of natural diffusion, the chloride profile at different depths on the concrete specimens exposed to marine environment of artificial seawater for over a year was obtained. While for the migration tests, the diffusion coefficient "D" at steady state (D_s) and non-steady state (D_{ns}), at different ages (7, 30 and 365 days) was determined. The concrete was kept in a moist chamber (20 ° C and 100% humidity on) until the test was carried out. The steel corrosion tests were carried

out on concrete specimens exposed to a marine environment throughout the investigation. To establish the corrosion rate (I_{corr}), the GERCOR utilizes the polarization resistance technique. This is a quantitative measure of the amount of steel oxidizing at the time of measurement. Relative to half-cell potentials (E_{corr}) and concrete resistivity also were measured. Half-cell potential tests were implemented to evaluate the probability of steel corrosion.

Test results reveal that with proper design, materials and construction, it is safe and feasible to apply recycled aggregate concrete as a structural material in civil engineering. The type of recycled aggregate has a great influence on the properties of concrete, and the amount and type of cement also have an important role. Using cement resistant to seawater, acceptable results were obtained for recycled concrete; therefore, effectively recycled aggregate concrete with the matrix of the cement paste is critical, the ratio w/c and the type of cement are significant factors in their durability properties and therefore on the type of application.

It has been found that concrete containing thick recycled aggregates made out of concrete is feasible for use against mechanical stresses and structural durability. And that currently, on the Spanish market, it is possible to find recycled concrete aggregates with the quality required for the manufacture of concrete of up to 40 MPa.

Índice

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1-1
1.1 MOTIVACIÓN	1-9
1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	1-10

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE	2-1
2.1 ÁRIDOS RECICLADOS.....	2-8
2.1.1 <i>Clasificación de los áridos reciclados.....</i>	<i>2-10</i>
2.1.2 <i>Producción de áridos reciclados</i>	<i>2-13</i>
2.1.3 <i>Aplicación de los áridos reciclados</i>	<i>2-17</i>
2.1.4 <i>Propiedades del árido reciclado.....</i>	<i>2-18</i>
2.2 DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN DE HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO.....	2-27
2.2.1 <i>Contenido de agua.....</i>	<i>2-27</i>
2.2.2 <i>Contenido de Cemento.....</i>	<i>2-29</i>
2.2.3 <i>Relación agua/cemento.....</i>	<i>2-29</i>
2.2.4 <i>Dosificación de áridos reciclados.....</i>	<i>2-31</i>
2.2.5 <i>Métodos de fabricación de hormigón con árido reciclado</i>	<i>2-32</i>
2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS.....	2-34
2.3.1 <i>Características del hormigón con árido reciclado en estado fresco....</i>	<i>2-36</i>
2.3.2 <i>Características del hormigón con árido reciclado en estado endurecido</i>	<i>2-37</i>
2.3.3 <i>Limites al contenido de árido reciclado en el hormigón</i>	<i>2-43</i>
2.4 MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS.....	2-44
2.5 PROPIEDADES DE DURABILIDAD DE HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS	2-48
2.6 LA CORROSIÓN DE ARMADURAS EN EL HORMIGÓN EXPUESTO A UN AMBIENTE MARINO	2-53
2.6.1 <i>Concentración de cloruros en el hormigón necesaria para que exista corrosión.....</i>	<i>2-57</i>
2.6.2 <i>Penetración de agentes agresivos en el hormigón. Mecanismos de transporte.....</i>	<i>2-62</i>

2.7	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS D	2-66
2.7.1	<i>Ensayos de Inmersión</i>	2-67
2.7.2	<i>Ensayos de Difusión</i>	2-68
2.7.3	<i>Ensayos acelerados – Migración</i>	2-68
2.7.4	<i>Análisis de las metodologías propuestas para la determinación del coeficiente de difusión de cloruros</i>	2-71
2.8	MECANISMOS DE TRANSPORTE EN EL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO.....	2-74
2.8.1	<i>Porosidad y permeabilidad</i>	2-75
2.8.2	<i>Succión capilar</i>	2-77
2.8.3	<i>Difusión - Penetración de Cloruros</i>	2-78
2.9	EL PROCESO DE CORROSIÓN DE ARMADURAS EN EL HORMIGÓN	2-83
2.9.1	<i>Medida de la corrosión</i>	2-89
2.9.2	<i>Relación entre el potencial eléctrico y el contenido en cloruros del hormigón</i>	2-95
2.10	CONCLUSIONES ESTADO DEL ARTE	2-97

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS	3-1
3.1 OBJETIVO GENERAL	3-1
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3-2

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL	4-1
4.1 ESTUDIOS PRELIMINARES: SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, DETERMINACIÓN DE LAS DOSIFICACIONES.....	4-4
4.1.1 <i>Selección y Caracterización de materias primas</i>	4-4
4.1.2 <i>Influencia de la continuidad de calidad del árido reciclado en la resistencia a compresión del hormigón</i>	4-6
4.1.3 <i>Evaluación de la influencia del estado de humedad de los áridos a introducir en la mezcla</i>	4-7
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES: DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS	4-9
4.3 DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN UN AMBIENTE MARINO.....	4-11
4.3.1 <i>Análisis de la migración de Cloruros en hormigón con áridos reciclados de RCD</i>	4-14

4.3.2	<i>Análisis de la difusión natural de cloruros en hormigón con áridos reciclados, expuestos a un ambiente marino</i>	4-16
4.3.3	<i>Evaluación de la corrosión en hormigones con árido reciclado</i>	4-17

CAPÍTULO 5

TÉCNICAS EXPERIMENTALES	5-1
5.1 CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS	5-1
5.1.1 <i>Densidad y absorción</i>	5-2
5.1.2 <i>Granulometría</i>	5-3
5.1.3 <i>Resistencia a la fragmentación</i>	5-3
5.1.4 <i>Composición</i>	5-4
5.1.5 <i>Mortero adherido</i>	5-5
5.2 FABRICACIÓN DE HORMIGONES Y PROBETAS	5-7
5.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE HORMIGONES.....	5-10
5.3.1 <i>Asentamiento</i>	5-10
5.3.2 <i>Densidad</i>	5-10
5.3.3 <i>Resistencia a Compresión</i>	5-11
5.3.4 <i>Resistencia a tracción indirecta</i>	5-11
5.3.5 <i>Modulo de elasticidad</i>	5-12
5.3.6 <i>Análisis de la microestructura del hormigón</i>	5-13
5.4 ASPECTOS DE DURABILIDAD. ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS Y CORROSIÓN DEL HORMIGÓN.....	5-15
5.4.1 <i>Porosidad</i>	5-16
5.4.2 <i>Penetración de agua bajo presión (permeabilidad)</i>	5-16
5.4.3 <i>Succión capilar</i>	5-17
5.4.4 <i>Penetración de Cloruros. Coeficiente de difusión</i>	5-20
5.4.4.1 <i>Ensayo de migración de cloruros</i>	5-20
5.4.4.2 <i>Análisis del contenido de Cloruros por difusión natural</i>	5-25
5.4.5 <i>Evaluación de la intensidad y el potencial de corrosión I_{corr} y E_{corr}</i>	5-28
5.4.5.1 <i>Procedimiento para la medida de la intensidad de corrosión</i>	5-29

CAPÍTULO 6

ESTUDIOS PREVIOS	6-1
6.1 MATERIALES	6-2
6.1.1 <i>Cemento</i>	6-2

6.1.2	<i>Áridos naturales</i>	6-3
6.1.3	<i>Áridos reciclados</i>	6-4
6.1.4	<i>Agua</i>	6-9
6.1.5	<i>Aditivos</i>	6-9
6.2	INFLUENCIA DE LA CONTINUIDAD DE CALIDAD DEL ÁRIDO RECICLADO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN	6-10
6.2.1	<i>Resultados y análisis</i>	6-13
6.2.2	<i>Estudio de Regresión</i>	6-25
6.3	EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL ESTADO DE HUMEDAD DE LOS ÁRIDOS A INTRODUCIR EN LA MEZCLA	6-30
6.3.1	<i>Planteamiento de los ensayos</i>	6-30
6.3.2	<i>Dosificación de los hormigones</i>	6-31
6.3.3	<i>Evaluación del comportamiento de los hormigones reciclados según las condiciones E1, E2, E3 y E4.</i>	6-34

CAPÍTULO 7

CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES		7-1
7.1	PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL HORMIGÓN.....	7-2
7.1.1	<i>Consistencia</i>	7-2
7.1.2	<i>Densidad</i>	7-4
7.1.3	<i>Resistencia a Compresión</i>	7-5
7.1.4	<i>Resistencia a Tracción</i>	7-11
7.1.5	<i>Módulo de Elasticidad</i>	7-13
7.2	MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN.....	7-17
7.2.1	<i>Evaluación de la interfase árido/pasta de cemento hidratada</i>	7-19
7.2.2	<i>Análisis de la zona de transición en hormigones</i>	7-22

CAPÍTULO 8

EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD FRENTE AL RIESGO DE CORROSIÓN DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO		8-1
8.1	EVALUACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSPORTE EN EL HORMIGÓN	8-2
8.1.1	<i>Porosidad</i>	8-2
8.1.2	<i>Permeabilidad</i>	8-5
8.1.3	<i>Absorción Capilar</i>	8-12

8.2	ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD	8-17
8.2.1	<i>Análisis por el método de migración de cloruros</i>	8-19
8.2.2	<i>Análisis del contenido de cloruros, por difusión natural</i>	8-30
8.3	EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS	8-38
8.3.1	<i>Hormigón en situación de inmersión secado</i>	8-38
8.3.2	<i>Hormigón en situación de inmersión Continua</i>	8-42

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	9-1
9.1 CONCLUSIONES	9-1
9.1.1 <i>Respecto a las propiedades Mecánicas</i>	9-2
9.1.2 <i>Respecto a las propiedades Durabilidad</i>	9-3
9.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	9-7

CAPÍTULO 10

BIBLIOGRAFÍA	10-1
---------------------------	-------------

Índice de figuras

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

FIGURA 1.1. CONCEPTO DEL CICLO CERRADO DE LA CONSTRUCCIÓN.	1-2
FIGURA 1.2. COMPARACIÓN DE LOS RESIDUOS PRODUCIDOS Y EL AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS MINERALES EN LA PRODUCCIÓN DE 1M ³ DE HC Y HAR.	1-3
FIGURA 1.3. PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS Y DE RESIDUOS DE RCD EN LA UNIÓN EUROPEA (BÖHMER, ET AL., 2008).	1-4
FIGURA 1.4. RECICLAJE DE LOS RCD PRODUCIDOS EN PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA PARA 2006 (UEPG, 2007).	1-5
FIGURA 1.5. RECICLADO DE RCD EN LA UE EN EL 2009 SEGÚN FIR (GERD, 2010).	1-5

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

FIGURA 2.1. NÚMERO DE ARTÍCULOS PUBLICADOS EN INGLES, REFERIDOS A LOS TÉRMINOS “RECYCLED, CONCRETE AGGREGATE” POR AÑO SEGÚN EN DISTINTOS BUSCADORES (PRYCE-JENKINS, 2011).	2-3
FIGURA 2.2. COMPOSICIÓN TÍPICA DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN RCD EN ALGUNAS CIUDADES EUROPEAS (HOLANDA, DINAMARCA, REPUBLICA CHECA, BÉLGICA (BÖHMER ET AL., 2008), GRECIA (OIKONOMOU, 2005), ESPAÑA (CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE, Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO, 2006-2016)).	2-9
FIGURA 2.3. ASPECTO DE DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO.	2-12
FIGURA 2.4. ETAPAS DE PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS	2-14
FIGURA 2.5. PLANTAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS EN ESPAÑA. A) MÓVIL. B) SEMI- MÓVIL. C) FIJA.	2-15
FIGURA 2.6. NIVELES TECNOLÓGICOS Y PROCESOS ASOCIADOS (BUSTILLO, 2010).	2-16
FIGURA 2.7. SISTEMAS DE TRITURACIÓN A) MACHACADORA DE MANDÍBULA, B) MACHACADORA DE IMPACTO, C) MACHACADORA DE CONO.	2-16
FIGURA 2.8. APLICACIONES PARA EL ÁRIDO RECICLADO.	2-17
FIGURA 2.9. ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN CON MORTERO ADHERIDO.	2-19
FIGURA 2.10. TRATAMIENTO CON ÁCIDO PARA LA DISOLUCIÓN DEL MORTERO ADHERIDO (TAM ET AL., 2007).	2-21
FIGURA 2.11. ANÁLISIS DE IMÁGENES PARA UNA FRACCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO (ABBAS, ET AL., 2009).	2-22

FIGURA 2.12. RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE MORTERO ADHERIDO Y EL TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO PARA LOS DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAYO.	2-24
FIGURA 2.13. PROCEDIMIENTO DE AMASADO DE HORMIGÓN. A) MÉTODO CONVENCIONAL B) PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO EN DOS ETAPAS TSMA (TAM ET AL., 2005).....	2-33
FIGURA 2.14. COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN SEGÚN EL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO (LIMBACHIYA ET AL., 2012).	2-43
FIGURA 2.15. DIFERENTES TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO EN LA MATRIZ DE UN HORMIGÓN A_{ef}/C 0,45 CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO.	2-44
FIGURA 2.16. CRISTALES DE HIDRÓXIDO DE CALCIO FORMADOS EN EL MORTERO ADHERIDO DEL ÁRIDO RECICLADO (KONG ET AL., 2010).	2-45
FIGURA 2.17. INTERFASE DE HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO SOMETIDO A UN PRETRATAMIENTO. A) CON HCL, B) CON H_2SO_4 Y C) INTERFASE DE UN HORMIGÓN RECICLADO SIN TRATAMIENTO (TAM ET AL., 2007).....	2-47
FIGURA 2.18. EVOLUCIÓN DE LA RESISTIVIDAD Y LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN (ARREDONDO-REA, ET AL., 2011).	2-52
FIGURA 2.19. MECANISMOS DE DETERIORO EN EL HORMIGÓN (ISGOR, 2001).	2-53
FIGURA 2.20. FASES DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN DE LA CORROSIÓN (TUUTTI, 1982).....	2-55
FIGURA 2.21. AMBIENTES DE EXPOSICIÓN PARA UN AMBIENTE MARINO, RIESGO DE CORROSIÓN Y MECANISMOS DE TRANSPORTE QUE INTERVIENEN.....	2-56
FIGURA 2.22. CONTENIDO CRÍTICO DE CLORUROS EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD AMBIENTE (GEHO, 1996).....	2-58
FIGURA 2.23. ION CLORURO EN EL HORMIGÓN.	2-59
FIGURA 2.24. DATOS DE VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE CLORUROS EXPRESADOS EL % DE CLORUROS TOTALES Y CLORUROS LIBRES (ALONSO & SÁNCHEZ, 2009).....	2-61
FIGURA 2.25. CAUSAS DE DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO (BASHEER, 1991; LONG, 2001).....	2-63
FIGURA 2.26. ENSAYO ASTM-C1202 (2005).....	2-69
FIGURA 2.27. MÉTODO CTH (TANG, 1992)	2-69
FIGURA 2.28. ENSAYO NORUEGO (NT BUILD 492, 1999).....	2-70
FIGURA 2.29. ESQUEMA DEL ENSAYO DE MIGRACIÓN DE CLORUROS (UNE 83987:2009).. ..	2-71
FIGURA 2.30. INFLUENCIA DEL VOLTAJE EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN, A PARTIR DE DATOS DE (MCGRATH & HOOTON, 1996)	2-72
FIGURA 2.31. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE HORMIGONES CON ÁRIDO NATURAL Y ÁRIDO RECICLADO (XIAO ET AL., 2012).	2-82
FIGURA 2.32. VALORES DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN ESTIMADO PARA LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO (XIAO ET AL., 2012).	2-82
FIGURA 2.33. CORROSIÓN DE ARMADURAS EN EL HORMIGÓN. PILA DE CORROSIÓN.	2-83

FIGURA 2.34. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO POTENCIAL/PH DE PARA ACERO EN SOLUCIÓN ACUOSA FE-H ₂ O A 25°C (POURBAIX, 1966).....	2-86
FIGURA 2.35. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE EVANS (EVANS, 1960). (EA Y EC: POTENCIALES DE ELECTRODO PARA EL ÁNODO Y EL CÁTODO; E _{CORR} E I _{CORR} : POTENCIAL E INTENSIDAD DE CORROSIÓN).	2-88
FIGURA 2.36. ESQUEMA DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL CON TRES ELECTRODOS (BRE, 1998).	2-91
FIGURA 2.37. VALORES ENCONTRADOS EN LA BIBLIOGRAFÍA PARA EL PORCENTAJE DE CLORUROS TOTALES EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL DEL ACERO DE REFUERZO (ALONSO, 2002).	2-96

CAPITULO 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

FIGURA 4.1. DISEÑO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	4-2
FIGURA 4.2. ESQUEMA ETAPA 1: ESTUDIOS PRELIMINARES: SELECCIÓN DE UN ÁRIDO RECICLADO Y SU ESTADO DE HUMEDAD PARA LA FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES.	4-4
FIGURA 4.3 ETAPA 3: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS SOMETIDO A UN AMBIENTE MARINO.	4-13
FIGURA 4.4 DISEÑO DE PROBETAS PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN.....	4-18

CAPITULO 5. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

FIGURA 5.1. TOMA Y REDUCCIÓN DE MUESTRAS.....	5-2
FIGURA 5.2. ENSAYO DE DENSIDAD.....	5-2
FIGURA 5.3. CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS ÁRIDOS.	5-3
FIGURA 5.4. EQUIPO PARA EL ENSAYO DE LOS ÁNGELES.	5-4
FIGURA 5.5. SEPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL ÁRIDO RECICLADO	5-4
FIGURA 5.6. PROCEDIMIENTO DE CHOQUE TÉRMICO EN LOS ÁRIDOS RECICLADOS.	5-6
FIGURA 5.7. DETALLES DEL ENSAYO. A) FRACCIONES UTILIZADAS. B) ÁRIDOS SOMETIDOS A MACHAQUEO PARA DESPRENDER EL MORTERO ADHERIDO.	5-6
FIGURA 5.8. SE PREPARAN LAS MATERIAS PRIMAS Y LOS MATERIALES A EMPLEAR (PROBETAS, CRONOMETRO, TERMÓMETRO, CONO, ETC.)	5-7
FIGURA 5.9. SE HUMEDece EL TAMBOR DE LA HORMIGONERA, SE AÑADEN LOS ÁRIDOS GRUESOS (DE MAYOR A MENOR TAMAÑO) Y SE INCORPORA 1/3 EL AGUA. 2 VUELTAS A LA HORMIGONERA PARA EXTENDER LOS ÁRIDOS Y ESPERAR 30 SEG.....	5-7
FIGURA 5.10. SE INTRODUCEN EL ÁRIDO FINO Y CEMENTO, SE PONE LA HORMIGONERA EN MARCHA Y SE AÑADE EL AGUA RESERVANDO UNA PEQUEÑA CANTIDAD DE AGUA PARA MEZCLAR CON EL ADITIVO. SE AMASA DURANTE 2 MINUTOS.	5-8

FIGURA 5.11. SE DEJA EN REPOSO 2 MINUTOS, SE AÑADE EL ADITIVO DISUELTO EN EL AGUA RESTANTE Y FINALMENTE 2 MINUTOS MEZCLANDO.	5-8
FIGURA 5.12. SE MIDE LA TEMPERATURA DEL HORMIGÓN, SE HACE EL CONO PARA EVALUAR LA CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN (CONSISTENCIA BLANDA, ENTRE 60-90MM) Y SI ES ADECUADO SE FABRICAN LAS PROBETAS.....	5-8
FIGURA 5.13. LAS PROBETAS SE MANTIENEN 24H CUBIERTAS, LUEGO SON RETIRADAS DE LOS MOLDES, MARCADAS Y ALMACENADAS EN LA CÁMARA HÚMEDA.....	5-9
FIGURA 5.14. DETALLE DE LA PREPARACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS PARA SER INTRODUCIDOS EN EL HORMIGÓN SEGÚN EL CASO DE ESTUDIO. ÁRIDOS PRESATURADOS E2 Y E3.	5-9
FIGURA 5.15. ENSAYO DE ASENTAMIENTO CON LOS HORMIGONES ESTUDIADOS.	5-10
FIGURA 5.16. EQUIPO PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.....	5-11
FIGURA 5.17. ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.....	5-12
FIGURA 5.18. ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	5-12
FIGURA 5.19. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM) MODELO JEOL JSM6300. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.....	5-13
FIGURA 5.20. ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS SEM/EDS. A) MUESTRAS DE HORMIGÓN PARA LA EVALUACIÓN MORFOLÓGICA DE LA ESTRUCTURA. B) MUESTRAS DE HORMIGÓN EMBEBIDAS EN RESINA EPÓXICA Y PULIDAS PARA LLEVAR A CABO ANÁLISIS EDS.	5-15
FIGURA 5.21. FABRICACIÓN DE MUESTRAS PARA SER ANALIZADAS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO. A) FABRICACIÓN DE LA PASTA CON LOS ÁRIDOS. B) CORTES REALIZADOS SOBRE LAS MUESTRAS CÚBICAS. C) MUESTRAS EMBUTIDAS PREPARADAS PARA EL ANÁLISIS.	5-15
FIGURA 5.22. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN. A) PROBETAS EN EL PERMEABILÍMETRO. B) ROTURA A TRACCIÓN DE LA PROBETA PARA TOMAR LAS MEDIDAS DE PENETRACIÓN MÁXIMA Y MEDIA.	5-17
FIGURA 5.23. PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR. A) CORTADO DE LAS PROBETAS B) SECADO DE LAS PROBETAS A 60°C. C) SELLADO DEL CONTORNO DE LAS PROBETAS PARA SU IMPERMEABILIDAD.	5-18
FIGURA 5.24. ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR. A) ESQUEMA DEL ENSAYO. B) PROBETA DE HORMIGÓN DURANTE EL ENSAYO DE SUCCIÓN. C) TOMA DE PESOS.	5-18
FIGURA 5.25. CURVA TÍPICA DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD EN EL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	5-19
FIGURA 5.26. EXTRACCIÓN DE TESTIGOS Y CORTE DE MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS.....	5-21

FIGURA 5.27. ESQUEMA DE MONTAJE DEL ENSAYO DE MIGRACIÓN DE CLORUROS Y EQUIPO (UNE 83987:2009)	5-21
FIGURA 5.28. TOMA DE DIÁMETROS, ESPESORES Y PESOS DE LAS PROBETAS, Y PUESTA EN VACÍO Y SATURACIÓN DE LAS MUESTRAS.	5-22
FIGURA 5.29. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN 1M NaCl, B) COLOCACIÓN DE LAS MUESTRAS Y LLENADO DE LAS CELDAS.....	5-22
FIGURA 5.30. ENSAYO SEGÚN LA NORMA UNE 83987: 2009 EN MARCHA, TOMA DE VOLTAJE, LECTURAS DE CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA	5-23
FIGURA 5.31. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD MEDIDA EN EL ANOLITO DURANTE EL ENSAYO (UNE 83987:2009)).....	5-23
FIGURA 5.32. A) EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE CLORUROS EN EL ANOLITO Y B) REGRESIÓN LINEAL DEL PERIODO CORRESPONDIENTE AL ESTADO ESTACIONARIO Y A LA REPRESENTACIÓN DEL TIEMPO DE PASO PARA HORMIGONES CON 0,5 DE A_{EF}/C SOMETIDOS A ENSAYO A 30 DÍAS (MEDIO PLAZO).	5-24
FIGURA 5.33. TOMA DE MUESTRAS SOBRE LAS PROBETAS DE ENSAYO Y TAMIZADO.	5-25
FIGURA 5.34. ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CLORUROS DEL HORMIGÓN A) MUESTRAS A ENSAYAR. B) SECADO DE LAS MUESTRAS EN LA ESTUFA Y C) CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS HASTA ENSAYO.	5-26
FIGURA 5.35. ENSAYO DE LA NORMA UNE-EN-14629, 2007. A) MATERIALES NECESARIOS PARA LA VALORACIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN B) FILTRADO DE LA MUESTRA....	5-26
FIGURA 5.36. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN, VALORACIÓN HASTA EL CAMBIO DE COLOR (UNE-EN-14629, 2007) A) MUESTRA PARA VALORACIÓN. B) ADICIÓN GOTA A GOTA DEL TIOCIANATO DE AMONIO. C) CAMBIO DE VIRAJE.	5-27
FIGURA 5.37. EQUIPO GERCOR6 PARA LA TOMA DE LECTURAS DE VELOCIDAD Y POTENCIAL DE CORROSIÓN.	5-29
FIGURA 5.38. PUNTO DE CONTACTO ENTRE LA UNIDAD DE MEDIDA Y LA BARRA DE ACERO DE REFUERZO. A) LIMPIEZA Y COLOCACIÓN DEL CABLE DE COBRE EN LA ARMADURA. B) LIMPIEZA DE LA ARMADURA PARA GARANTIZAR EL CONTACTO ADECUADO CON LA BARRA DE ACERO EMBEBIDA.	5-30
FIGURA 5.39. PROBETAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN. A) MONTAJE PARA LA FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS. B) TOMA DE LECTURAS E_{CORR} E I_{CORR}	5-30
FIGURA 5.40. PREPARACIÓN DE AGUA DE MAR PARA SIMULACIÓN DEL ATAQUE EN HORMIGÓN ARMADO. Y PROBETAS SOMETIDAS AL AMBIENTE AGRESIVO.	5-32

CAPITULO 6. ESTUDIOS PREVIOS

FIGURA 6.1. CURVA GRANULOMÉTRICA DE LOS ÁRIDOS NATURALES. UNE EN 933-2.....	6-4
FIGURA 6.2. CURVA GRANULOMÉTRICA DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS GRUESOS. UNE EN 933-2.	6-6
FIGURA 6.3. ROTURAS SATISFATORIAS EN LAS PROBETAS SOMETIDAS A ENSAYO.	6-13
FIGURA 6.4. VALORES DE DENSIDAD PARA HORMIGONES CON DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN. A) HORMIGONES CON RELACIÓN $A_{R10'}/C$ 0,45. B) HORMIGONES CON RELACIÓN $A_{R10'}/C$ 0,55.	6-14
FIGURA 6.5. RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 DÍAS EN HORMIGONES CON DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO. A) HORMIGONES CON RELACIÓN $A_{R10'}/C$ 0,45. B) HORMIGONES CON RELACIÓN $A_{R10'}/C$ 0,55.....	6-14
FIGURA 6.6. RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS EN HORMIGONES CON DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO. A) HORMIGONES CON RELACIÓN $A_{R10'}/C$ 0,45. B) HORMIGONES CON RELACIÓN $A_{R10'}/C$ 0,55.....	6-15
FIGURA 6.7. RELACIÓN DE VALORES MEDIOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS EN HORMIGONES CON DIFERENTES TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO RESPECTO A LA RELACIÓN A/C Y C/A. A) PARA LA RELACIÓN A_{EF}/C . B) PARA LA RELACIÓN A_{TOT}/C	6-16
FIGURA 6.8. RESISTENCIA A COMPRESIÓN PROMEDIO A 28 DÍAS DE HORMIGONES CON DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN.	6-17
FIGURA 6.9. COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL HORMIGÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN Y LA RELACIÓN A/C PARA 7 DÍAS Y 28 DÍAS.	6-18
FIGURA 6.10. COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 DÍAS EN HORMIGONES CON DIFERENTES TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO.	6-21
FIGURA 6.11. COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS EN HORMIGONES CON DIFERENTES TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO.	6-21
FIGURA 6.12. COEFICIENTE DE VARIACIÓN INTRAGRUPAL DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN HORMIGONES CON DIFERENTES TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO. A) A 7 DÍAS. B) A 28 DÍAS.	6-23
FIGURA 6.13. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA LAS DISTINTAS RELACIONES $A_{R10'}/C$ 0,45 Y 0,55.....	6-23
FIGURA 6.14. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN INTRAGRUPAL DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 DÍAS SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO...	6-24
FIGURA 6.15. RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS PARA HORMIGONES CON RELACIÓN $A_{R10'}/C=0,45$ Y $A_{R10'}/C=0,55$ Y DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO.....	6-25
FIGURA 6.16. AJUSTE DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE HORMIGONES CON 0,45 DE RELACIÓN AGUA/CEMENTO.	6-33

FIGURA 6.17. VALORES DE CONSISTENCIA DE HORMIGONES SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO Y EL ESTADO DE HUMEDAD EN QUE SON INTRODUCIDOS EN LA MEZCLA.	6-35
FIGURA 6.18. DENSIDAD DE HORMIGONES PARA LOS PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN ESTABLECIDOS Y LOS DISTINTOS ESTADOS EVALUADOS.....	6-36
FIGURA 6.19. RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS EN HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO BAJO DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD EN LA MEZCLA.....	6-37
FIGURA 6.20. RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS EN HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO EN DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD RESPECTO A LA RELACIÓN A/C Y C/A, SEGÚN LA RELACIÓN AGUA CEMENTO TOTAL O EFECTIVA (A_{TOT}/C O A_{EF}/C). A) PARA LA RELACIÓN A_{TOT} . B) PARA LA RELACIÓN A_{EF}	6-38

CAPITULO 7. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES

FIGURA 7.1. ASENTAMIENTO DEL CONO DE ABRAMS PARA HORMIGONES CON DIFERENTES PORCENTAJES DE ÁRIDO RECICLADO, SEGÚN SU RELACIÓN A_{EF}/C	7-3
FIGURA 7.2. DENSIDAD DEL HORMIGÓN A 28 DÍAS EN CONDICIONES DE RECEPCIÓN PARA HORMIGONES CON DIFERENTES PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO.	7-4
FIGURA 7.3. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,45 Y DIFERENTES CANTIDADES DE ÁRIDO RECICLADO.	7-6
FIGURA 7.4. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,50 Y DIFERENTES CANTIDADES DE ÁRIDO RECICLADO.	7-6
FIGURA 7.5. RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS PARA HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,45 Y 0,50 CON DIFERENTES CANTIDADES DE ÁRIDO RECICLADO.	7-7
FIGURA 7.6. COEFICIENTES DE VARIACIÓN SOBRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO ENSAYADOS A DISTINTAS EDADES PARA LAS RELACIONES A_{EF}/C 0,45 (A), 0,50 (B).	7-8
FIGURA 7.7. COEFICIENTES DE REDUCCIÓN PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO RESPECTO A UN HORMIGÓN CON ÁRIDO NATURAL..	7-9
FIGURA 7.8. RESULTADOS DE LA RESISTENCIA MEDIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN. VALORES EXPERIMENTALES Y SEGÚN LA ECUACIÓN DE LA PEÑA CON LOS FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CADA RELACIÓN A_{TOT}/C	7-11
FIGURA 7.9. RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA A 28 DÍAS SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO PARA LAS RELACIONES A_{EF}/C ESTUDIADAS.	7-11
FIGURA 7.10. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DE HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO BAJO DISTINTOS CRITERIOS.	7-12
FIGURA 7.11. RESISTENCIA COMPRESIÓN VS. RESISTENCIA TRACCIÓN INDIRECTA A 28 D.	7-13

FIGURA 7.12. MODULO DE ELASTICIDAD EVALUADO A 28 DÍAS SEGÚN EL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO PARA CADA RELACIÓN A/C ESTUDIADA.	7-14
FIGURA 7.13. EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,45 A PARTIR DE LOS VALORES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	7-15
FIGURA 7.14. EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,50 SEGÚN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	7-16
FIGURA 7.15. EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,45 EL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO.	7-16
FIGURA 7.16. EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA HORMIGONES CON RELACIÓN A/C 0,50 EL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO.	7-17
FIGURA 7.17. SECCIÓN TRANSVERSAL DE PROBETAS DE HORMIGÓN A/C 0,50 CON DISTINTAS CANTIDADES DE ÁRIDO RECICLADO A. 0%, B. 50% Y C. 100%.	7-18
FIGURA 7.18. IMÁGENES DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) OBTENIDAS POR ELECTRONES RETRODISPERSADOS EN HORMIGONES CON ÁRIDO NATURAL (A) Y ÁRIDO RECICLADO (B).	7-19
FIGURA 7.19. IDENTIFICACIÓN DE LAS INTERFASES PRESENTES EN UNA PASTA CON LA INCLUSIÓN DE UN ÁRIDO RECICLADO A TRAVÉS DE UN MAPPING DE CA OBTENIDO MEDIANTE ANÁLISIS EDS.	7-20
FIGURA 7.20. ANÁLISIS EDS EN PASTAS CON ÁRIDO NATURAL DE ORIGEN CALIZO. A) MICROFOTOGRAFÍA DE ELECTRONES RETRODISPERSADOS. B) MAPPING DE SÍLICE (Si). C) MAPPING DE CALCIO (CA).	7-21
FIGURA 7.21. ANÁLISIS EDS EN PASTAS CON ÁRIDO RECICLADO, ÁRIDO GRUESO DE NATURALEZA CALIZA Y ÁRIDOS FINOS DE NATURALEZA SILÍCEA. A) MICROFOTOGRAFÍA DE ELECTRONES RETRODISPERSADOS. B) MAPPING DE SÍLICE (Si). C) MAPPING DE CALCIO (CA).	7-21
FIGURA 7.22. MICROGRAFÍAS POR RETRO-DISPERSIÓN Y MAPAS DE COMPOSICIÓN DE UN HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO. A) ÁRIDO RECICLADO DE ORIGEN SILÍCEO. B) ÁRIDO RECICLADO DE ORIGEN CALIZO.	7-22
FIGURA 7.23. IMÁGENES POR ELECTRONES SECUNDARIOS DE LAS INTERFASES DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO.	7-23
FIGURA 7.24. A) MICROGRAFÍA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN EN EL ÁRIDO RECICLADO (ÁRIDO ANTIGUO/PASTA ANTIGUA). B) ANÁLISIS EDS PARA LA PASTA ANTIGUA.	7-24
FIGURA 7.25. ZONA DE TRANSICIÓN EN HORMIGONES A_{EF}/C 0,45 CONSTITUIDOS CON ÁRIDOS RECICLADOS.	7-25
FIGURA 7.26. PRODUCTOS FORMADOS EN LA INTERFASE DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO (100%).	7-26

CAPITULO 8. EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD FRENTE AL RIESGO DE CORROSIÓN DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO

FIGURA 8.1. POROSIDAD DE LOS HORMIGONES A 28 DÍAS SEGÚN LA CANTIDAD DE ÁRIDO RECICLADO PARA CADA RELACIÓN A_{EF}/C	8-3
FIGURA 8.2. POROSIDAD A 28 DÍAS EN LOS HORMIGONES ESTUDIADOS. A) SEGÚN LA RELACIÓN A_{TOT}/C . B) SEGÚN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	8-4
FIGURA 8.3. POROSIDAD DE HORMIGONES A DISTINTAS EDADES Y CON DIFERENTE CANTIDAD DE ÁRIDO RECICLADO. A) RELACIÓN A_{EF}/C 0,45 Y B) RELACIÓN A_{EF}/C 0,50.....	8-5
FIGURA 8.4. RESULTADOS DE PENETRACIÓN MÁXIMA DE AGUA BAJO PRESIÓN A 28 DÍAS EN HORMIGONES CON DISTINTOS CONTENIDOS DE ÁRIDO RECICLADO Y RELACIÓN A_{EF}/C	8-6
FIGURA 8.5. RESULTADOS DE PENETRACIÓN MEDIA DE AGUA BAJO PRESIÓN EN HORMIGONES CON DISTINTOS CONTENIDOS DE ÁRIDO RECICLADO A 28 DÍAS.	8-7
FIGURA 8.6. PROBETAS PARA LECTURA DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS CON DISTINTOS CONTENIDOS DE ÁRIDO RECICLADO (0, 20, 50 Y 100%).	8-7
FIGURA 8.7. PENETRACIÓN MÁXIMA DE AGUA BAJO PRESIÓN A 28 DÍAS EN HORMIGONES SEGÚN LA RELACIÓN A_{TOT}/C	8-8
FIGURA 8.8. PENETRACIÓN MÁXIMA DE AGUA BAJO PRESIÓN SEGÚN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN A 28 DÍAS.....	8-9
FIGURA 8.9. EVALUACIÓN DE LA PENETRACIÓN MÁXIMA DE AGUA BAJO PRESIÓN EN HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO A DISTINTAS EDADES, SEGÚN LA RELACIÓN A_{EF}/C	8-10
FIGURA 8.10. EVALUACIÓN DE LA PENETRACIÓN MEDIA DE AGUA BAJO PRESIÓN EN HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO A DISTINTAS EDADES, SEGÚN LA RELACIÓN A_{EF}/C	8-11
FIGURA 8.11. PROBETA SOMETIDA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA LECTURA DE LA PROFUNDIDAD DE AGUA BAJO PRESIÓN.....	8-11
FIGURA 8.12. ABSORCIÓN CAPILAR DE AGUA PARA HORMIGONES CON 90 DÍAS DE EDAD. A) HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,45. B) HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C 0,50.....	8-12
FIGURA 8.13. RESULTADOS DE LAS PRIMERAS 24 HORAS DEL ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR EN HORMIGONES CON 90 DÍAS DE EDAD. A) HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C DE 0,45. B) HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C DE 0,50.....	8-13
FIGURA 8.14. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR PARA HORMIGONES CON RELACIÓN A_{EF}/C DE 0,45 Y 0,50 CON DIFERENTES NIVELES DE SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO, ENSAYADOS A 28 Y 90 DÍAS.....	8-14
FIGURA 8.15. CAMBIO EN EL COEFICIENTE DE SUCCIÓN CAPILAR PARA LOS HORMIGONES DE ESTUDIO A 28 Y 90 DÍAS.	8-15

FIGURA 8.16. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR A 28 DÍAS, PARA DISTINTOS HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO.	8-15
FIGURA 8.17. TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE SUCCIÓN CAPILAR SEGÚN LA RELACIÓN A_{TOT}/C DEL HORMIGÓN Y LA EDAD DE ENSAYO.....	8-16
FIGURA 8.18 CURVAS OBTENIDAS EN EL ENSAYO, SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD MEDIA EN EL TIEMPO PARA HORMIGONES CON 7 DÍAS.....	8-20
FIGURA 8.19. TIEMPO DE PASO EN SEGUNDOS PARA HORMIGONES CON DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDO RECICLADO Y RELACIÓN A/C , ENSAYADOS A 30 DÍAS.....	8-20
FIGURA 8.20. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO NO ESTACIONARIO (DNS) SEGÚN LA RELACIÓN A_{TOT}/C Y A_{EF}/C PARA HORMIGONES ANALIZADOS A 7 DÍAS.....	8-21
FIGURA 8.21. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO NO ESTACIONARIO (DNS) SEGÚN LA RELACIÓN A_{EF}/C PARA HORMIGONES ANALIZADOS A 30 DÍAS.	8-21
FIGURA 8.22. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO NO ESTACIONARIO (DNS) SEGÚN LA RELACIÓN A_{EF}/C PARA HORMIGONES ANALIZADOS A 365 DÍAS.....	8-22
FIGURA 8.23. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO ESTACIONARIO (Ds) SEGÚN LA RELACIÓN A/C PARA HORMIGONES ENSAYADOS A 7 DÍAS (CORTO PLAZO).....	8-23
FIGURA 8.24. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO ESTACIONARIO (Ds) SEGÚN LA RELACIÓN A/C PARA HORMIGONES ENSAYADOS A 30 DÍAS (MEDIO PLAZO).	8-24
FIGURA 8.25. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO ESTACIONARIO (Ds) SEGÚN LA RELACIÓN A/C PARA HORMIGONES ANALIZADOS A UN AÑO (LARGO PLAZO).....	8-24
FIGURA 8.26. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EN ESTADO NO ESTACIONARIO DNS A 7 DÍAS, 30 DÍAS Y 1 AÑO, SEGÚN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.	8-26
FIGURA 8.27. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO Ds A 7 DÍAS, 30 DÍAS Y 1 AÑO, SEGÚN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.....	8-26
FIGURA 8.28. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO NO ESTACIONARIO DNS PARA LOS HORMIGONES ESTUDIADOS A 7 Y 30 DÍAS.	8-28
FIGURA 8.29. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN ESTADO ESTACIONARIO Ds PARA LOS HORMIGONES ESTUDIADOS A 7 Y 30 DÍAS.	8-28
FIGURA 8.30. VALORES DE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE CLORUROS A 1 AÑO PARA HORMIGONES CON ÁRIDO NATURAL Y HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN. DNS Y Ds.....	8-29
FIGURA 8.31. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS PARA HORMIGONES CON ÁRIDO NATURAL (AN) Y 100% DE ÁRIDO RECICLADO (ARH) CON RELACIÓN A/C 0,50 A DISTINTAS EDADES. A) COEFICIENTE EN ESTADO NO ESTACIONARIO DNS. B) COEFICIENTE EN ESTADO ESTACIONARIO Ds.	8-30

FIGURA 8.32. PERFIL DE CLORUROS PARA LOS HORMIGONES ANALIZADOS A PARTIR DE LA NORMA UNE EN 14629:07. A) CONDICIONES DE INMERSIÓN CONTINUA IC. B) CONDICIONES DE INMERSIÓN SECADO IS.	8-31
FIGURA 8.33. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN A PARTIR DEL CONTENIDO EN CLORUROS PARA HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL TRAS UN AÑO EN AMBIENTE MARINO SEGÚN LA CONCENTRACIÓN SUPERFICIAL.....	8-33
FIGURA 8.34. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN A PARTIR DEL CONTENIDO EN CLORUROS DE HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL TRAS UN AÑO DE EXPOSICIÓN EN AMBIENTE MARINO SEGÚN LA RELACIÓN A/C.	8-33
FIGURA 8.35. CONCENTRACIÓN SUPERFICIAL DE CLORUROS EN HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL TRAS UN AÑO DE EXPOSICIÓN EN AGUA DE MAR ARTIFICIAL SEGÚN LA RELACIÓN A/C.	8-34
FIGURA 8.36. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN ESTADO NO ESTACIONARIO Dns RESPECTO A LA RELACIÓN A_{TOT}/C , PARA LOS HORMIGONES ESTUDIADOS Y DATOS DE LA BIBLIOGRAFÍA CORRESPONDIENTES AL ENSAYO DE MIGRACIÓN.	8-35
FIGURA 8.37. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN ESTADO NO ESTACIONARIO Dns PARA LOS HORMIGONES ESTUDIADOS Y DATOS DE LA BIBLIOGRAFÍA RESPECTO A LA CANTIDAD DE ÁRIDOS RECICLADOS.....	8-36
FIGURA 8.38. VALORES DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS SOBRE HORMIGONES CON 1 AÑO, ANALIZADOS BAJO ENSAYOS DE MIGRACIÓN Y DE DIFUSIÓN NATURAL.	8-37
FIGURA 8.39. POTENCIAL DE CORROSIÓN (E_{CORR}) A 35 Y 50 MM PARA LOS HORMIGONES CON 0%, 20%, 50% Y 100% DE ÁRIDO RECICLADO, SOMETIDO A CICLOS DE INMERSIÓN SECADO (I/S).....	8-39
FIGURA 8.40. INTENSIDAD DE CORROSIÓN (I_{CORR}) PARA HORMIGONES CON 0%, 20%, 50% Y 100% DE ÁRIDO RECICLADO, CON 35 Y 50 MM DE RECUBRIMIENTO, SOMETIDO A CICLOS DE INMERSIÓN SECADO (I/S).....	8-41
FIGURA 8.41. POTENCIAL DE CORROSIÓN E_{CORR} A 35 Y 50 MM PARA LOS HORMIGONES CON 0%, 20%, 50% Y 100% DE ÁRIDO RECICLADO, SOMETIDO A INMERSIÓN CONTINUA (IC).	8-44
FIGURA 8.42. INTENSIDAD DE CORROSIÓN (I_{CORR}) PARA HORMIGONES CON 0%, 20%, 50% Y 100% DE ÁRIDO RECICLADO, CON 35 Y 50 MM DE RECUBRIMIENTO, SOMETIDO A CICLOS DE INMERSIÓN CONTINUA (IC).	8-45
FIGURA 8.43. PROBETAS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDAS A ROTURA PARA OBSERVAR LAS ARMADURAS EMBEBIDAS.	8-46

Índice de tablas

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

TABLA 2.1. PROPIEDADES ESTUDIADAS SOBRE EL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO.	2-5
TABLA 2.2. PROPIEDADES DE DURABILIDAD ESTUDIADAS SOBRE EL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO.....	2-7
TABLA 2.3. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS SEGÚN EL TIPO (RILEM, 1994).....	2-10
TABLA 2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS (DIN_4226-100, 2002).	2-11
TABLA 2.5. SECCIÓN DE LA TABLA 20 DE LA NORMA UNE-EN_12620, 2009, PARA ÁRIDOS RECICLADOS GRUESOS.	2-11
TABLA 2.6. CLASIFICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS SEGÚN SU COMPOSICIÓN (GEAR PROJECT, 2011).	2-12
TABLA 2.7. CLASIFICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS (TAM & TAM, 2007).	2-13
TABLA 2.8. LÍMITES ESTABLECIDOS EN LA EHE (MINISTERIO DE FOMENTO DE ESPAÑA, 2008) SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS PARA HORMIGÓN (20 % SUSTITUCIÓN).	2-20
TABLA 2.9. MÁXIMO CONTENIDO DE IMPUREZAS EN EL ÁRIDO RECICLADO.	2-25
TABLA 2.10. REQUISITOS PARA HORMIGONES SOMETIDOS A UN AMBIENTE MARINO SEGÚN LA INSTRUCCIÓN EHE-08 (SECCIÓN TOMADA DE TABLA 37.3.2.A Y 37.3.2.B).	2-30
TABLA 2.11. VALORES LIMITE RECOMENDADOS PARA LA COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL HORMIGÓN (SECCIÓN TOMADA DE TABLA F.1 EN 206-1).	2-30
TABLA 2.12. TENDENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO, RESPECTO A UN HORMIGÓN CON ÁRIDO NATURAL, SEGÚN LOS INVESTIGADORES.	2-34
TABLA 2.13. FORMÁS DE ESTIMAR LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DE HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO.....	2-39
TABLA 2.14. ECUACIONES PROPUESTAS PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD E EN HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO.	2-40
TABLA 2.15. TENDENCIA DE LAS PROPIEDADES DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO, RESPECTO A UN HORMIGÓN CON ÁRIDO NATURAL.....	2-49
TABLA 2.16. ENSAYOS DE CLORUROS SEGÚN EL MÉTODO DE ANÁLISIS.....	2-59
TABLA 2.17. RIESGO DE CORROSIÓN SEGÚN EL CONTENIDO DE CL (BAMFORTH, 1996).....	2-60

TABLA 2.18. CONTENIDO CRITICO DE CLORUROS SEGÚN EL AMBIENTE DE EXPOSICIÓN Y LA RELACIÓN A/C (IZQUIERDO, 2003).....	2-60
TABLA 2.19. VALORES LÍMITE PARA EL CONTENIDO DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN SEGÚN DISTINTAS NORMATIVAS (GONZÁLEZ & MIRANDA, 2007).	2-62
TABLA 2.20. VALORES DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE SU PERMEABILIDAD.....	2-73
TABLA 2.21. VALORES DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN, ESTADO ESTACIONARIO, ENSAYOS DE MIGRACIÓN (NILSSON, 1996) Y VALORES PROPUESTOS POR LA EHE (TABLA A.9.4) PARA UN CEM I Y TIEMPO T=0,0767.....	2-73
TABLA 2.22. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA SELECCIONAR EL ENSAYO DE MIGRACIÓN DE CLORUROS.	2-74
TABLA 2.23. CALIDAD DEL HORMIGÓN SEGÚN SU POROSIDAD (CEB, 1998).....	2-76
TABLA 2.24. TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE ESTUDIO DE LA CORROSIÓN, VENTAJAS E INCONVENIENTES PRINCIPALES (GONZÁLEZ & MIRANDA, 2007).....	2-90
TABLA 2.25. PROBABILIDAD DE CORROSIÓN SEGÚN CRITERIO DE LA ASTM-C876, 2009....	2-92
TABLA 2.26. VALORES TÍPICOS DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO EN EL HORMIGÓN (ELSENER <i>ET AL.</i> , 2003).....	2-93
TABLA 2.27. CRITERIOS PROPUESTOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN A PARTIR DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.	2-94
TABLA 2.28. TIEMPO PARA EL DESARROLLO DE LA CORROSIÓN, SEGÚN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN.....	2-94
TABLA 2.29. DATOS DE LA BIBLIOGRAFÍA SOBRE EL POTENCIAL ELÉCTRICO Y EL UMBRAL DE CLORUROS EN PROBETAS DE MORTERO Y HORMIGÓN (ALONSO <i>ET AL.</i> , 2002).	2-95

CAPITULO 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

TABLA 4.1 MATERIALES.....	4-5
TABLA 4.2. HORMIGONES SOBRE LOS QUE SE ESTUDIÓ LA INFLUENCIA EN LA CONTINUIDAD DE LA CALIDAD DEL ÁRIDO RECICLADO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN (NÚMERO DE PROBETAS FABRICADAS).	4-7
TABLA 4.3. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE HUMEDAD DEL ÁRIDO RECICLADO EN CADA CASO, CON LA RELACIÓN A/C EN EL HORMIGÓN.	4-8
TABLA 4.4. HORMIGONES Y NÚMERO DE PROBETAS SOBRE LOS QUE SE EVALÚAN PROPIEDADES MECÁNICAS.	4-10
TABLA 4.5. HORMIGONES Y NUMERO DE PROBETAS SOBRE LOS QUE SE ANALIZAN LAS PROPIEDADES DE DURABILIDAD.....	4-14
TABLA 4.6. PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	4-15

TABLA 4.7. HORMIGONES SOMETIDOS A LA EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CLORUROS.	4-16
TABLA 4.8. COMPOSICIÓN DEL AGUA DE MAR FABRICADA EN EL LABORATORIO.....	4-17

CAPITULO 6. ESTUDIOS PREVIOS

TABLA 6.1. RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE EL CEMENTO.	6-2
TABLA 6.2. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS NATURALES.....	6-3
TABLA 6.3. DETALLE DEL ORIGEN Y FUENTE DEL ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN.	6-5
TABLA 6.4. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS, RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.	6-6
TABLA 6.5. CLASIFICACIÓN DE LOS CONSTITUYENTES EN LOS ÁRIDOS RECICLADOS GRUESOS. UNE-EN 933-11.....	6-8
TABLA 6.6. MORTERO ADHERIDO EN ÁRIDOS RECICLADOS.....	6-9
TABLA 6.7. DATOS DE LA FICHA TÉCNICA DEL PRODUCTO PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE	6-9
TABLA 6.8. DOSIFICACIÓN POR M ³ PARA HORMIGONES CON ÁRIDO NATURAL 0% Y RELACIÓN AR ₁₀ '/C 0,45 Y 0,55 (E3).	6-11
TABLA 6.9. DOSIFICACIÓN POR M ³ PARA HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO Y RELACIÓN AR ₁₀ '/C 0,45 (E3).	6-11
TABLA 6.10. DOSIFICACIÓN POR M ³ PARA HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO Y RELACIÓN AR ₁₀ '/C 0,55 (E3).	6-12
TABLA 6.11. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS.	6-19
TABLA 6.12. CANTIDAD DE MATERIALES POR METRO CUBICO PARA HORMIGONES CON DIFERENTES PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO RECICLADO.....	6-33
TABLA 6.13. VALORES DE A _{EF} /C Y A _{TOT} /C PARA LOS DISTINTOS CASOS Y HORMIGONES.....	6-34

CAPITULO 7. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES

TABLA 7.1. DOSIFICACIÓN DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS.	7-2
TABLA 7.2. VALOR DEL CONO PARA LOS HORMIGONES ESTUDIADOS CON LA CANTIDAD DE ADITIVO UTILIZADA.....	7-3
TABLA 7.3. ECUACIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A PARTIR DE LA RELACIÓN A/C, SEGÚN LA FORMULACIÓN PROPUESTA POR DE LA PEÑA.....	7-10

CAPITULO 8. EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD FRENTE AL RIESGO DE CORROSIÓN DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO

TABLA 8.1. VARIABLES ANALIZADAS SOBRE LOS HORMIGONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	8-18
---	------

Capítulo 1

Introducción

La industria de la construcción usa en el mundo aproximadamente 1,6 billones de toneladas de cemento y 10 billones de toneladas de arena, grava y rocas trituradas cada año para la producción de hormigón. En consecuencia, además del impacto ambiental generado por los gases efecto invernadero, debe considerarse el impacto por extracción de recursos que da lugar a deforestación y pérdida de suelo (Mehta, 2001). La demanda global de áridos para el sector de la construcción, pronosticada para 2011 estaba alrededor de 26,8 mil millones de toneladas métricas (Freedonia, 2007) y se espera que el mercado mundial aumente un 5,2% anual hasta 2015 llegando una demanda de 48,3 mil millones de toneladas métricas (Freedonia, 2012).

Debido a que cada vez las fuentes de recursos son más escasas y los lugares dispuestos como vertederos no alcanzan a cubrir la demanda o simplemente no están gestionados correctamente, el proceso constructivo se convierte en foco de detrimento por el efecto negativo que causa sobre el medio ambiente y la sociedad en general. Las nuevas tecnologías deben optimizar procesos en los que la utilización y explotación de los materiales se haga de manera eficiente.

La preservación y conservación del medio ambiente compatible con un progreso industrial es uno de los puntos esenciales del desarrollo sostenible y la gestión de

los residuos de construcción y demolición va en esa línea, intentando hacer del ciclo de la construcción un ciclo cerrado (Figura 1.1), donde la eliminación en vertedero sea mínima.

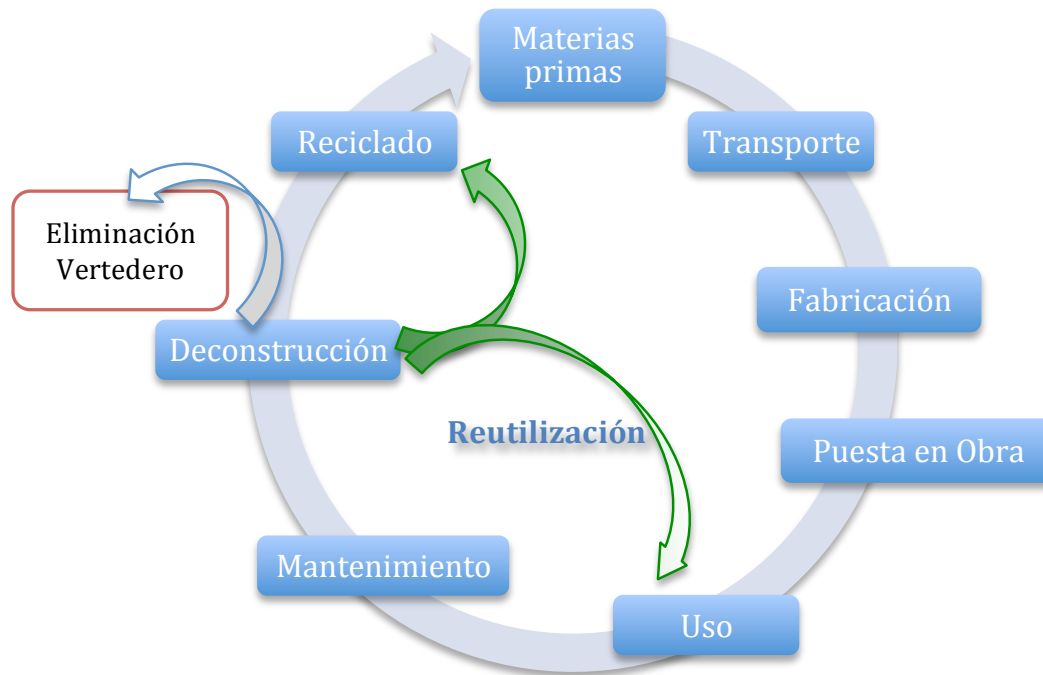


Figura 1.1. Concepto del ciclo cerrado de la construcción.

La idea de un hormigón con árido reciclado, es viable y posible en términos económicos y ambientales (Barth, 1994; Dhir *et ál.*, 1999; Abbas A, 2006; Parekh & Modhera, 2011), pero debe garantizarse una calidad adecuada según su uso, de ahí la importancia de las investigaciones que se desarrollan sobre este material. De su durabilidad depende que sea más sostenible que un hormigón normal. En general si se compara el uso de áridos naturales (AN) respecto al uso de áridos reciclados (AR), para la producción de hormigón, sin tener en cuenta el transporte y utilizando la misma cantidad de cemento, el uso de áridos reciclados permite reducir el consumo de recursos naturales y la producción de residuos (Marinković *et ál.*, 2010) lo cual es positivo para la industria de la construcción (Figura 1.2).

Con el fin de contribuir a la mejora del medio ambiente y generar un desarrollo sostenible, conscientes del buen uso que se debe dar a los recursos, actualmente se plantean programas de reciclaje en el sector de la construcción; además se

adelantan investigaciones relacionadas con la reutilización de los RCD, con el objetivo de conocer sus propiedades y así poder ser utilizados como materiales de construcción bajo una normativa que los respalde.

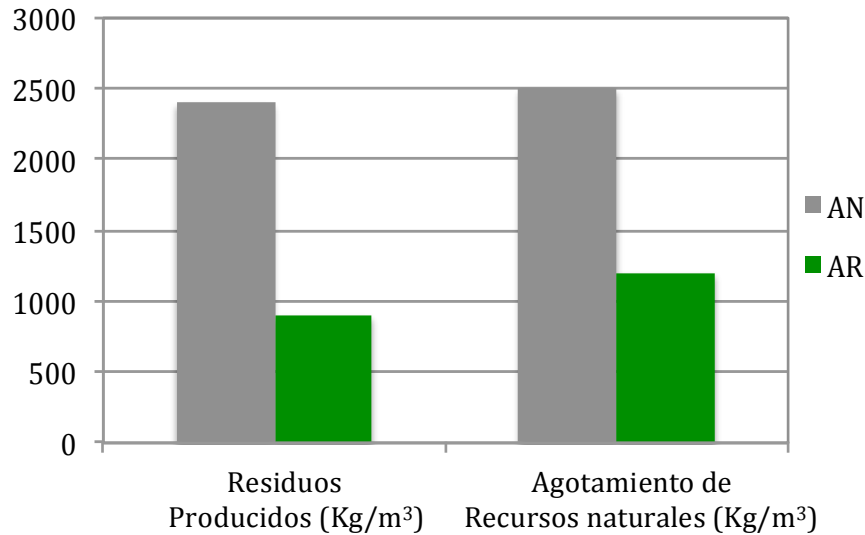


Figura 1.2. Comparación de los residuos producidos y el agotamiento de los recursos minerales en la producción de 1m³ de HC y HAR.

Respecto al estado de la situación actual, durante el 2006 España produjo 485,5 millones de toneladas de áridos, ocupando el segundo lugar en la producción de áridos en la Unión Europea después de Alemania (Figura 1.3). De la producción de áridos, según datos estimativos relativos a años anteriores, aproximadamente el 65% se dedica a la fabricación de hormigones, morteros, aglomerados asfálticos y prefabricados y el 35% restante a la construcción de bases y subbases en carreteras, rellenos, escolleras y como balasto de ferrocarril. Cerca de 35 millones de toneladas de Residuos de construcción y deconstrucción RCD, fueron producidas en 2006, de las cuales solo 1,5 millones de toneladas fueron posteriormente clasificadas como áridos reciclados. Actualmente la producción de RCD ha descendido llegando en 2009 a 23 millones de toneladas al año, sin incluir tierras de excavación (Datos GERD).

En general en Europa el uso de áridos reciclados ha incrementado su demanda a partir de los 80's a una tasa diferente para cada país. Sin embargo, durante los

últimos años, la demanda de la cantidad de áridos tanto naturales como reciclados, se ha reducido como resultado de la reciente recesión en el sector de la construcción.

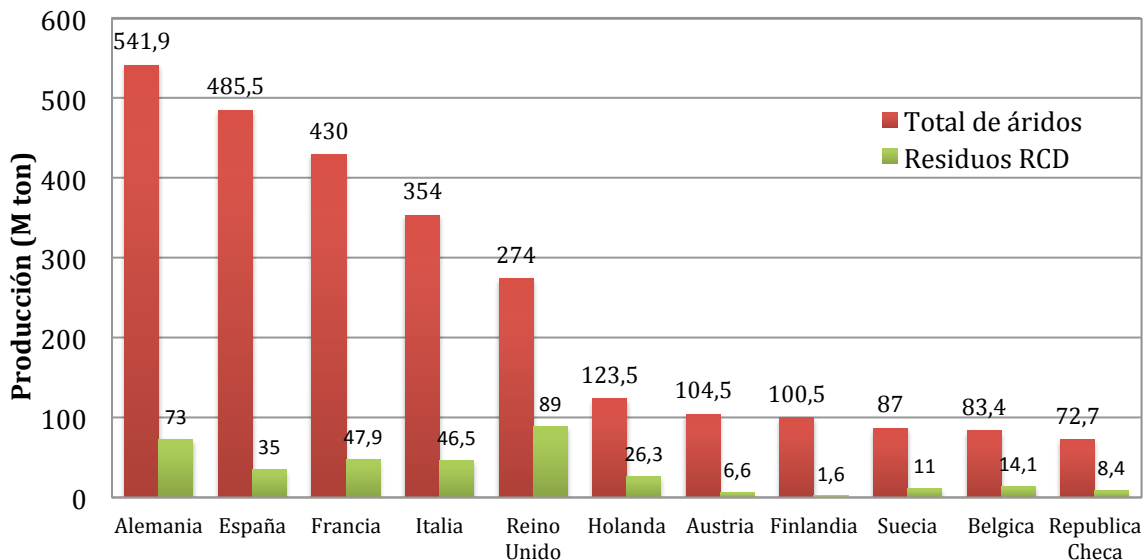


Figura 1.3. Producción de áridos y de residuos de RCD en la Unión Europea (Böhmer, *et al.*, 2008).

La producción de RCD en la Unión Europea está por encima de 200 millones de toneladas de RCD al año, cantidad que se ha visto reducida en los últimos años. Los países con los mayores tasa de reciclado de residuos de construcción y demolición, son el Reino Unido-Escocia, Países Bajos, Dinamarca, Bélgica y Alemania (Böhmer *et al.*, 2008). Se estima que el 80% de los residuos de construcción y demolición (o RCD) generados en España (entre 30 y 40 millones de toneladas al año) pueden valorizarse (GERD, 2010). En 2006 solo un 5,1% de los RCD retornaba al ciclo de la construcción como árido reciclado, estando muy por debajo de la media europea situada alrededor de un 48% (Figura 1.4).

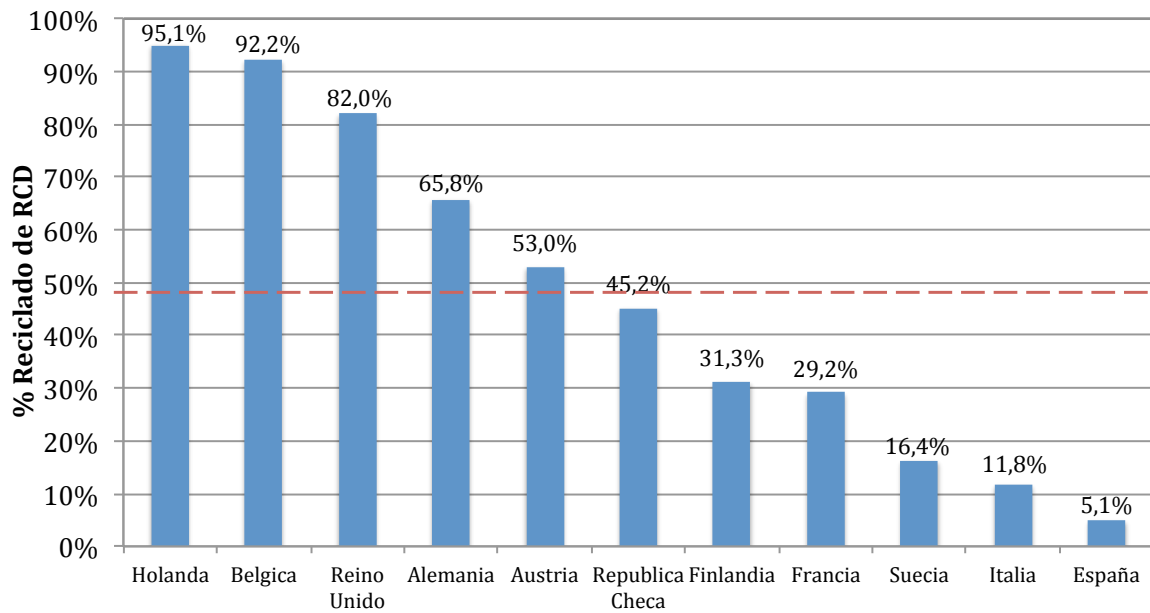


Figura 1.4. Reciclaje de los RCD producidos en países de la Unión Europea para 2006 (UEPG, 2007).

La Federación Internacional de Reciclaje FIR, presenta algunos datos sobre la cantidad de RCD reciclados para algunos países de la unión Europea en 2009 (Figura 1.5), y llama la atención cómo por ejemplo Bélgica, con un volumen de la industria de la construcción claramente inferior al de España, genera una mayor cantidad de productos reciclados.

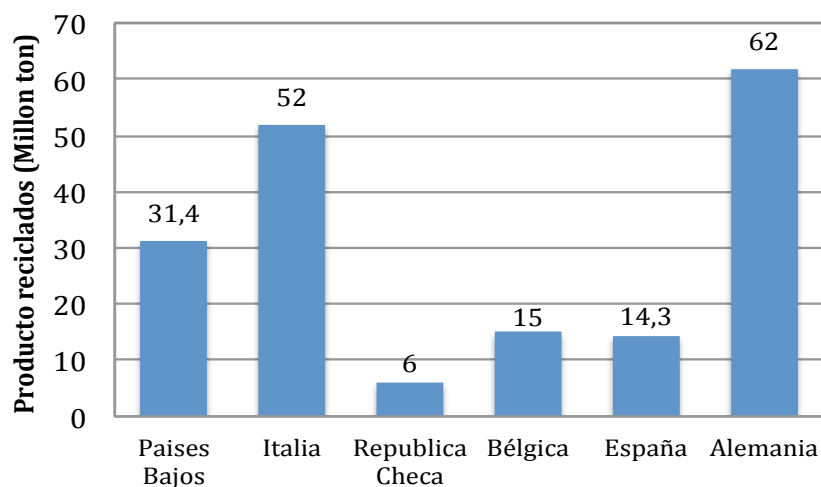


Figura 1.5. Reciclado de RCD en la UE en el 2009 según FIR (GERD, 2010).

Ante esta situación, que traspasa las fronteras del sector, las administraciones nacionales y locales actúan mediante planes que permitan un adecuado manejo de estos residuos y un fomento del reciclaje y reutilización. En España, el Ministerio de Medio Ambiente publicó en el año 2001 un Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 (PNRCD (BOE B. O., 2001)), que fijaba unos objetivos de disminución en un 10% para la generación de RCD y un nivel de reciclado del 25% en el año 2006, objetivos que no se cumplieron. Con el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (BOE B. O., 2009), dentro del que se encuentra el segundo Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición, España pretende mejorar su gestión y elevar la tasa de reciclaje hasta llegar a un 50% en 2015.

A pesar del reducido nivel de reciclaje en España existen numerosos estudios e investigaciones experimentales de laboratorio que han evaluado la posibilidad de utilizar estos materiales reciclados para la fabricación de hormigón. Entre las investigaciones llevadas a cabo en España tenemos:

- Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. (Barra, 1996).
- Caracterización de RCD de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para la fabricación de hormigones. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. de Minas. (Parra y Alfaro, 2001)
- Comportamiento tenso deformación, instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. (Gómez-Soberón, 2002).
- Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: Dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Tesis doctoral. Universidad Politécnica A Coruña. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. (González-Fonteboa, 2002).
- Diseño de nuevos materiales procedentes del reciclaje de escombros de construcción y demolición: RUE (Residuos urbanos de edificación) y RAHA

(Residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cantabria. (Gilbert, 2003).

- Estudio experimental sobre microestructura y comportamiento estructural del hormigón reciclado. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. (Etxeberria, 2004).
- Estudio sobre la utilización del árido reciclado en hormigón estructural. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. (Sánchez, 2004).
- Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo. (López-Gayarre, 2008)
- Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad en prefabricación. E.U. de Arquitectura Técnica (UPM). (Pérez-Benedicto, 2011).

La Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por medio del Departamento de Ingeniería de la Construcción, y el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), ha participado activamente en investigaciones relacionadas con el uso de áridos reciclados en hormigón estructural.

- El proyecto RECNHOR (2006-2008) “Estudio prenормativo sobre la utilización de los RCDs en hormigón reciclado de aplicación estructural”, coordinado por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Fomento) y en el que además de la UPV, participaron seis organismos de investigación de diversos puntos del país, para desarrollar una investigación prenормativa, que permitiera una puesta en común de las características y propiedades de hormigón con árido reciclado para dar base a la nueva normativa EHE, que contempla en su anejo número 15 el uso de hormigón con árido reciclado con hasta un 20% de sustitución para uso estructural en España (EHE-08, Ministerio de Fomento, 2008).
- Proyecto CLEAM (2008-2010) “Construcción Limpia, Eficiente y Amigable Con El Medio Ambiente” Tarea 2.1. Reciclado de RCDs como áridos de hormigones estructurales. financiado por la agrupación CLEAM-CENIT, AIE. Enmarcado en

la convocatoria de subvenciones del programa CENIT realizada por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial en BOE nº 35, de 9 de febrero de 2007, según resolución 5 de febrero de 2007. Cuya tarea 2.1. es "Áridos reciclados para fabricación de hormigones estructurales", aparece como continuación de la línea de investigación iniciada con RECNHOR que también es coordinada por el CEDEX .

- Proyecto GEAR (2008-2010). "Guía Española de Áridos Reciclados", coordinado por el GERD (Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición), y financiado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, donde participan un número considerable de entidades que intervienen en el sector, para estudiar los áridos reciclados producidos en España y su uso potencial en diversas aplicaciones tales como, hormigón compactado por rodillos, hormigón en masa, elementos prefabricados y carreteras, que generen una gran demanda y exijan unas calidades normales.

La propiedad del hormigón que se utiliza como referencia en el momento de diseñar un elemento estructural de hormigón, en una primera instancia, es su resistencia y en la etapa de ejecución su trabajabilidad. Pero la durabilidad del hormigón condicionara permanentemente parámetros de diseño como la resistencia a compresión esperada. La elección de materiales debe ser acorde con el proyecto, pero además amigable con el medio ambiente apuntando a un desarrollo sostenible. Por ello es evidente la conveniencia de introducir áridos reciclados en la fabricación de nuevos hormigones con árido reciclado, sobre todo si tenemos en cuenta que los áridos representan las tres cuartas partes del volumen total del hormigón.

El hormigón con árido reciclado también debe cumplir los requisitos de resistencia mecánica y antes de que pueda ser utilizado como material estructural debe comprobarse que presenta condiciones aceptables ante circunstancias de exposición en ambientes agresivos. De ahí la importancia de una investigación exhaustiva de la durabilidad del hormigón reciclado para su aplicación como material estructural.

El desarrollo de esta tesis aborda el estudio de la durabilidad del hormigón armado, con árido reciclado, evaluando los parámetros que condicionan los

mecanismos de transporte de agentes agresivos al interior del hormigón, como la permeabilidad, la succión capilar y la difusión por medio de la penetración de cloruros que pueden desencadenar la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón, ya que la interacción entre éste y el medio ambiente es el principal factor de deterioro de este tipo de estructuras.

Hoy por hoy, la durabilidad del hormigón se basa principalmente en dotarle de resistencia mecánica suficiente y recubrir la armadura con un espesor de hormigón suficiente para protegerla, ya que en la práctica la mayoría de las estructuras que presentan corrosión tienen un espesor de recubrimiento insuficiente. Por lo tanto dentro de el plan de trabajo de esta investigación se pretende también evaluar la validez de los recubrimientos especificados en la instrucción EHE-08 (Ministerio de Fomento de España, 2008) en el caso de usar hormigones con áridos reciclados en diferentes porcentajes de sustitución y valorar su comportamiento en condiciones normales y de exposición a un ambiente agresivo como el agua de mar.

1.1 Motivación

Se pretende con este trabajo evaluar el comportamiento y uso de los áridos reciclados para su aplicación en hormigón estructural. Analizando de manera experimental las características que debe presentar el hormigón, como producto final, para que no se vea afectado de manera negativa en sus propiedades mecánicas y durabilidad al incorporar áridos reciclados de RCD.

Teniendo en cuenta que el mercado de los áridos reciclados existente en España y otros países puede ofrecer áridos adecuados para el uso en hormigón, se evalúa el porcentaje y la calidad del árido a utilizar. El desarrollo de esta investigación permite además analizar el comportamiento de los áridos reciclados en el hormigón frente a un ambiente agresivo de agua de mar.

Todos los esfuerzos enfocados a contribuir al conocimiento sobre el uso de áridos reciclados para la fabricación de hormigón son válidos dentro del abanico de

aplicaciones posibles. No en vano utilizar áridos reciclados es un tema de actualidad que preocupa a las entidades gubernamentales y a la industria. La validación y difusión de los resultados obtenidos a continuación contribuye en la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición permitiendo así llegar a establecer el ciclo cerrado de la construcción.

1.2 Estructura del documento

El documento se compone de 9 capítulos, que se organizan de la siguiente manera:

En este **Capítulo 1** se ha presentado una **introducción** al tema de la Tesis Doctoral, manifestando la importancia de su realización al tratarse de estudiar el comportamiento de un material reciclado de RCD en hormigón, como alternativa de uso en construcción, contribuyendo al ciclo cerrado de la construcción, además se resalta su necesidad, viabilidad y actualidad.

El **Capítulo 2** contiene una **revisión bibliográfica** para conocer el estado actual del conocimiento de los áridos reciclados y su uso en hormigón estructural frente a las distintas propiedades mecánicas y de durabilidad. Se muestran los temas estudiados por los distintos autores, encontrando que frente al análisis de la corrosión escasean las investigaciones y que en general existe poca unanimidad de conclusiones en lo relativo a las propiedades de durabilidad del hormigón con árido reciclado.

En el **Capítulo 3** se definen los **objetivos**. Partiendo del análisis del estado del arte se plantean el objetivo general y los objetivos específicos sobre el estudio de la durabilidad de hormigones armados reciclados y su comportamiento frente a la acción de los cloruros en un ambiente marino.

El **Capítulo 4** describe el **programa experimental** en el que se definen los lineamientos del trabajo desarrollado. Se exponen las variables analizadas y las fases experimentales en las que se ha dividido esta tesis doctoral para poder llegar

a alcanzar los objetivos planteados. Se incluye un análisis de estudios previos, la caracterización física y mecánica de los hormigones y un análisis de la durabilidad.

En el **Capítulo 5** se resumen las **técnicas experimentales** empleadas para el análisis de las propiedades estudiadas, con el propósito de obtener unos resultados fiables sobre las propiedades de los áridos y los hormigones estudiados.

Los estudios previos realizados se detallan en el **capítulo 6**. En ellos se seleccionó el árido reciclado a utilizar y los criterios de dosificación con un estado de humedad adecuado para el uso de áridos reciclados en el hormigón para la fabricación de hormigones sobre los que se evaluó la durabilidad. En este capítulo, el análisis preliminar de la variabilidad del uso de áridos reciclados en la resistencia a compresión, tiene como fin soportar y dar mayor robustez a los datos obtenidos en la campaña experimental, además de permitir seleccionar un árido reciclado base para las siguientes etapas.

A lo largo del **Capítulo 7** se presentan los resultados de las propiedades características de los hormigones con árido reciclado tomando como referencia un hormigón con árido natural. Se analizan propiedades físicas y mecánicas en estado fresco y endurecido.

El **Capítulo 8** contiene el análisis de la durabilidad de los hormigones con árido reciclado estudiados en esta tesis doctoral. Los mecanismos de transporte como penetración, succión capilar y difusión son estudiados y en particular el fenómeno de penetración de cloruros mediante ensayos de migración y difusión, además el potencial y la intensidad de corrosión de hormigones con árido reciclado son evaluados a partir del programa experimental que se ha desarrollado a lo largo de 15 meses.

Finalmente, en el **Capítulo 9**, se presentan las **conclusiones** obtenidas y se plantean las **líneas de investigación futuras**.

Por último, se presentan las **Referencias bibliográficas** empleadas en el desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

Capítulo 2

Estado del arte

El hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción, donde los áridos representan cerca del 80% de su volumen (Mehta, 2001; Fernández, 2004), haciendo indiscutible su influencia sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón.

El origen del uso de residuos de construcción y demolición RCD (escombros) como áridos reciclados, se relaciona con el fin de la segunda guerra mundial, cuando países como Reino Unido y Alemania empiezan su reconstrucción (Nixon, 1978). Sin embargo existe un referente histórico del uso de RCD, se trata del aparejo de construcción usado desde mediados del s. I a. C. que los romanos denominaron *opus signinum* (de Signia, en el Lacio) que es una especie de hormigón compuesto de cal, arena o puzolana y ladrillo picado o polvo de ladrillo, que además de su dura consistencia, resultaba impermeable.

El árido reciclado, es una materia prima formada básicamente por los escombros de las demoliciones sometidos a un proceso de trituración y/o selección. La norma UNE-EN 12620:2009 lo define como el árido resultante del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción. Los áridos reciclados de RCD constituyen en cualquier núcleo urbano de cierta importancia, una fuente inagotable de áridos, tanto para su empleo directo, por ejemplo como material de

relleno, como para su uso como áridos de machaqueo en numerosas aplicaciones: hormigón, carreteras, etc. (Bustillo, 2010).

Los áridos reciclados de hormigón son definidos como la fracción fina y gruesa de áridos obtenidos por la trituración de hormigón antiguo y el hormigón reciclado es el hormigón nuevo producido utilizando cantidades de áridos reciclados (BCSJ, 1977).

Las investigaciones sobre el uso de áridos reciclados fueron iniciadas en Rusia. Glushge, (1946) establece que el árido reciclado tiene una menor densidad que el árido natural y que para un hormigón fabricado con árido reciclado se obtiene una menor resistencia a compresión. Posteriormente se investiga acerca del efecto de los materiales contaminantes en los áridos reciclados (Newman, 1946), concretamente en Alemania se determina que el yeso genera en el hormigón una mayor expansión a corto plazo y tiende a concentrarse en la fracción más fina (Graf, 1948).

Hacia los años 70's diversas investigaciones (Buck, 1973; Malhorta, 1976; Frondistou-Yannas, 1977; Buck, 1977; Nixon, 1978), estudian los procesos de trituración de los RCD, diseños de mezcla, propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón con áridos reciclados.

Sobre las propiedades del árido reciclado, (Malhorta, 1976; Buck, 1977) resaltan la mayor absorción de los áridos reciclados especialmente para la fracción fina, debido a la porosidad y las fisuras en la pasta de cemento.

Como características del hormigón con áridos reciclados se establece que poseen una menor densidad y un mayor contenido de aire (Malhorta, 1976), además de una menor resistencia a compresión para igual relación agua/cemento frente a un hormigón con áridos naturales. Sin embargo, la resistencia es fácilmente mejorable con el uso de una menor relación agua cemento o, una mayor cantidad de cemento o, el uso de adiciones minerales como cenizas volantes (Buck, 1977). La trabajabilidad de las mezclas también se ve disminuida cuando se utiliza árido reciclado grueso y fino, efecto que puede ser atenuado por el uso de aditivos, aunque siempre el uso de árido fino incrementa la demanda de agua.

Propiedades como la adherencia de la pasta a los áridos reciclados y el modulo de elasticidad de los hormigones, se ven disminuidas a medida que se incorporan áridos reciclados en el hormigón (Frondistou-Yannas, 1977) mientras que la retracción por secado aumenta (Nixon, 1978). Respecto a las propiedades de durabilidad (Buck, 1973; Malhorta, 1976) evalúan la resistencia a la acción del hielo-deshielo de hormigones con árido reciclado, encontrándola muy similar a la de hormigones con áridos naturales.

A partir de estos estudios un volumen significativo de investigaciones se ha publicado a lo largo de los últimos años en todo el mundo, lo cual ha generado una base para normativas de uso y recomendaciones.

Pryce-Jenkins realiza una búsqueda en tres bases de datos de ingeniería, Compendex (Engineering Village), ISI Web of Knowledge y SCOPUS SciVerse; utilizando como término de búsqueda "Recycled concrete aggregate" (árido reciclado de hormigón), y restringiendo en la búsqueda el idioma: Inglés, y obtiene el gráfico que se presenta en la Figura 2.1 donde se observa como a partir del año 2001 las publicaciones sobre éste tema toman fuerza con sus picos más altos en los años 2004 y 2009-2010 (Pryce-Jenkins, 2011).

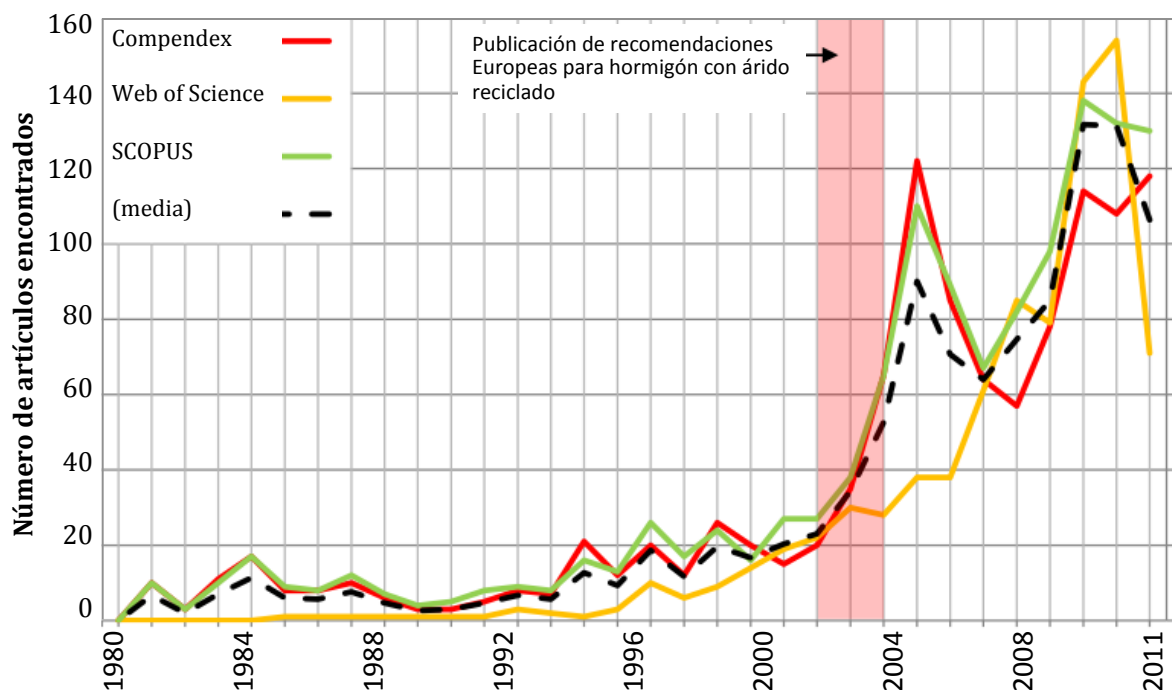


Figura 2.1. Número de artículos publicados en inglés, referidos a los términos "Recycled, concrete aggregate" por año según en distintos buscadores (Pryce-Jenkins, 2011).

Con la búsqueda bibliográfica realizada durante el desarrollo de esta tesis doctoral, se ha elaborado la Tabla 2.1 donde se observan las propiedades estudiadas por diversos investigadores, a lo largo de los años sobre el hormigón con áridos reciclados. En la tabla se señala qué tipo de árido reciclado fue utilizado (Hormigón/Mixto), la fracción empleada (Fina/Gruesa) y las distintas propiedades investigadas: trabajabilidad, resistencia a compresión, a tracción, cortante, el módulo de elasticidad, la zona de interfase, adherencia, retracción, fluencia y propiedades de durabilidad.

Las investigaciones sobre la durabilidad han jugado un papel importante, sin embargo, como se observa en la Tabla 2.2, el estudio de la corrosión de armaduras en el hormigón reciclado no ha sido muy experimentado, no obstante, durante los dos últimos años se evalúa el comportamiento del hormigón reciclado frente a la penetración de los cloruros con gran dispersión en los resultados obtenidos.

Tabla 2.1. Propiedades estudiadas sobre el hormigón con árido reciclado.

Año	Autor	Árido		Tamaño					Propiedades							
		H	M	G	F	W	fc'	fct	V	E	ITZ	B	R/F	D		
1946	(Glushge, 1946)	✓		✓	✓	✓	✓	✓								
1973	(Buck, 1973)	✓		✓	✓	✓	✓	✓								✓
1977	(Buck, 1977).	✓		✓	✓	✓	✓	✓								
1977	(Malhorta, 1976)	✓		✓	✓	✓	✓	✓								✓
1977	(Frondistou-Yannas, 1977)	✓		✓		✓	✓	✓		✓	✓					
1978	(Nixon, 1978) R	✓				✓	✓	✓		✓						
1985	(Ravindrarajah & Tam, 1985)	✓		✓	✓		✓	✓						✓		
1986	(Hansen, 1986) R	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓						✓
1988	(Ravindrajah <i>et ál.</i> , 1988)	✓		✓	✓		✓	✓								
1995	(Topcu & Güncan, 1995)	✓		✓			✓	✓		✓						
1996	(Barra M., 1996)	✓		✓		✓	✓	✓		✓						✓
1998	(Barra & Vázquez, 1998))	✓	✓	✓			✓	✓								
1999	(Dhir, <i>et ál.</i> , 1999)	✓		✓	✓		✓	✓								✓
2000	(Limbachiya <i>et ál.</i> , 2000)	✓		✓			✓	✓		✓				✓	✓	✓
2002	(Gomez-Soberon, 2002)	✓		✓												
2002	(Ajdukiewicz & Kliszczewi, 2002)	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
2002	(Olorunsogo & Padayachee, 2002)	✓		✓												✓
2003	(Katz, 2003)	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓				✓	✓	✓
2003	(Zaharieva <i>et ál.</i> 2003)	✓		✓	✓	✓	✓	✓								✓
2004	(Poon, <i>et ál.</i> , 2004)	✓		✓			✓	✓								
2004	(Levy & Helene, 2004)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓								✓
2004	(Gonçalves <i>et ál.</i> , 2004)	✓		✓			✓	✓								✓
2004	(Sánchez M. , 2004)	✓		✓			✓	✓	✓		✓					✓
2004	(Topçu & Sengel, 2004)	✓		✓			✓	✓	✓							✓
2004	(Khalaf & DeVenny, 2004)		✓	✓			✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
2005	(Xiao <i>et ál.</i> , 2005)	✓		✓			✓	✓		✓						
2005	(González-F & Martínez-A, 2005)	✓		✓			✓	✓	✓	✓						
2005	(Tam <i>et ál.</i> , 2005)	✓		✓								✓				
2004	(Khalaf & DeVenny, 2004)		✓	✓			✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
2005	(Xiao <i>et ál.</i> , 2005)	✓		✓			✓	✓		✓						
2005	(González F. & Martínez-A., 2005)	✓		✓			✓	✓	✓	✓						
2005	(Kheder & Al-Windawi, 2005)	✓		✓			✓	✓	✓	✓						
2006	(Tu <i>et ál.</i> , 2006)	✓		✓	✓	✓	✓	✓								✓
2006	(Xiao <i>et ál.</i> , 2006) R	✓		✓			✓	✓		✓						

Tipo de Árido

H: árido reciclado Hormigón

M: árido reciclado Mixto

Fracción

G: fracción Gruesa

F: fracción fina

Propiedades

W: trabajabilidad

fc': Resistencia a compresión

fct: Resistencia a tracción

E: Módulo de Elasticidad

V: Cortante

ITZ: Interfase pasta-árido

B: Adherencia hormigón / armadura

R/F: Retracción por Secado /Fluencia

D: Durabilidad

Tabla 2.1. Propiedades estudiadas sobre el hormigón con árido reciclado (continuación).

Año	Autor	Árido Tamaño					Propiedades								
		H	M	G	F	W	fc'	fct	V	E	ITZ	B	R/F	D	
2007	(Etxeberria, (a) <i>et ál.</i> , 2007)	✓		✓			✓		✓						
2007	(Etxeberria (b) <i>et ál.</i> , 2007)	✓		✓		✓	✓	✓		✓	✓				
2007	(Mymrin & Correa, 2007)	✓		✓	✓		✓					✓			
2007	(González-F. & Martínez-A., 2007)	✓		✓		✓	✓	✓	✓						
2007	(Xiao & Falkner, 2007)	✓		✓		✓	✓					✓			
2007	(Rahal, 2007)	✓		✓			✓			✓					
2008	(Ann <i>et ál.</i> , 2008)	✓		✓		✓	✓	✓							✓
2008	(Tam <i>et ál.</i> , 2008)	✓		✓		✓	✓								
2008	(González-F. & Martínez-A., 2008)	✓		✓		✓	✓	✓		✓					
2009	(Tam <i>et ál.</i> , 2009)	✓		✓			✓						✓		
2009	(Abbas <i>et ál.</i> , 2009)	✓		✓		✓	✓								✓
2009	(Domingo <i>et ál.</i> , 2009)	✓		✓		✓	✓					✓		✓	
2009	(Corinaldesi & Moriconi, 2009)	✓		✓	✓		✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓
2009	(Berndt, 2009)	✓		✓			✓	✓		✓					✓
2010	(Marinković <i>et ál.</i> , 2010)	✓		✓		✓	✓								
2010	(Debieb <i>et ál.</i> , 2010)	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓
2010	(Evangelista, 2010)	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓					✓
2010	(Gokce <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓		✓	✓								✓
2010	(Corinaldesi V. , 2010)	✓		✓	✓	✓	✓			✓			✓		
2011	(Qin <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓											✓
2011	(Kou <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓		✓	✓	✓					✓	✓	✓
2011	(Richardson <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓	✓		✓								✓
2011	(Sim & Park, 2011)	✓		✓	✓		✓								✓
2011	(Corral-Higuera <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓											✓
2011	(Chakradhara <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓		✓	✓	✓		✓					✓
2011	(Zega & Di Maio, 2011)	✓		✓	✓		✓	✓		✓			✓	✓	✓
2011	(Butler <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓		✓	✓					✓			
2012	(Kwan <i>et ál.</i> , 2012)	✓		✓			✓						✓	✓	✓
2012	(Limbachiya <i>et ál.</i> , 2012)	✓		✓		✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓
2012	(Fathifazl <i>et ál.</i> , 2011)	✓		✓		✓	✓						✓		
2012	(Xiao <i>et ál.</i> , 2012) R	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tipo de Árido

H: árido reciclado Hormigón

M: árido reciclado Mixto

Fracción

G: fracción Guesa

F: fracción fina

Propiedades

W: trabajabilidad

fc' : Resistencia a compresión

fct : Resistencia a tracción

E: Módulo de Elasticidad

V: Cortante

ITZ: Interfase pasta-árido

B: Adherencia hormigón / armadura

R/F: Retracción por Secado /Fluencia

Tabla 2.2. Propiedades de durabilidad estudiadas sobre el hormigón con árido reciclado.

Año	Autor	P	H-dH	Abs	Pors	Carbon.	Pen Cl	Corrosión
1973	(Buck, 1973)		✓					
1977	(Malhorta, 1976)		✓					
1986	(Hansen, 1986) R	✓	✓	✓		✓		✓
1996	(Barra M., 1996)		✓					
1999	(Dhir <i>et ál.</i> , 1999)		✓	✓		✓		
2000	(Limbachiya <i>et ál.</i> , 2000)		✓				✓	✓
2002	(Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002)		✓					
2002	(Olorunsogo & Padayachee, 2002)	✓		✓			✓	
2003	(Katz, 2003)			✓		✓		
2003	(Zaharieva <i>et ál.</i> , 2003)	✓		✓	✓		✓	
2003	(Otzuki <i>et ál.</i> , 2003)					✓	✓	
2004	(Levy & Helene, 2004)			✓	✓	✓		
2004	(Gonçalves <i>et ál.</i> , 2004)	✓		✓			✓	
2004	(Topçu & Sengel, 2004)		✓					
2006	(Tu <i>et ál.</i> , 2006)						✓	
2008	(Ann <i>et ál.</i> , 2008)	✓						✓
2009	(Berndt, 2009)	✓					✓	
2009	(Abbas <i>et ál.</i> , 2009)		✓			✓	✓	
2009	(Corinaldesi & Moriconi, 2009)					✓	✓	
2010	(Gokce <i>et ál.</i> , 2011)		✓					
2010	(Debieb <i>et ál.</i> , 2010)	✓	✓	✓	✓			✓
2010	(Evangelista & Brito, 2010)			✓		✓	✓	
2010	(Kong <i>et ál.</i> , 2010)						✓	
2011	(Chakradhara <i>et ál.</i> , 2011)			✓	✓		✓	
2011	(Kou <i>et ál.</i> , 2011)						✓	
2011	(Richardson <i>et ál.</i> , 2011)		✓					
2011	(Qin <i>et ál.</i> , 2011)						✓	
2011	(Sim & Park, 2011)					✓	✓	
2011	(Corral-Higuera <i>et ál.</i> , 2011)						✓	✓
2011	(Zega & Di Maio, 2011)	✓		✓				
2012	(Kwan <i>et ál.</i> , 2012)	✓		✓				
2012	(Limbachiya <i>et ál.</i> , 2012)			✓		✓	✓	
2012	(Xiao <i>et ál.</i> , 2012) R					✓	✓	

Propiedades

P: Permeabilidad al agua /oxígeno
H-dH: Resistencia al hielo – des hielo
Abs: Absorción/ Succión Capilar

Pors: Porosidad
Carb: Carbonatación
Pen Cl: Penetración de Cloruros
Corrosión: Corrosión de armaduras

2.1 Áridos Reciclados

Los áridos reciclados son obtenidos del procesamiento de residuos de construcción y demolición RCD y pueden ser clasificados en función de la naturaleza de los residuos de origen (Sánchez, 2004). Al proceder de fuentes asociadas a los residuos provenientes de la construcción y la deconstrucción de estructuras y obras civiles, estos áridos pueden incluir en distintas cantidades una serie de materiales, como productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfáltico y en menor medida otros componentes como madera, vidrio, plástico, etc., que es necesario identificar y controlar para las distintas aplicaciones.

La composición de los residuos de construcción y demolición varía de un país a otro, incluso de una región a otra. Se ve afectada por numerosos factores, incluyendo las materias primas y materiales de construcción utilizados, las técnicas de construcción, y las prácticas de deconstrucción o demolición. Además la composición también depende de la separación de los residuos en origen, del sistema de trituración, el nivel de trituración, el cribado y el tratamiento de limpieza, que la planta de gestión de residuos realiza.

En la Figura 2.2 se presenta una composición típica de los residuos de construcción y demolición en distintos países. Los datos corroboran una amplia gama de composiciones posibles de los RCD. Sin embargo, algunas tendencias son evidentes, aproximadamente un tercio de los residuos RCD son de hormigón y el porcentaje de albañilería varía de 6 a 35% para casi todos los países, excepto España, donde los materiales de hormigón en los RCD representan el 12%, mientras que el material cerámico el 54%. La tendencia puede ir en el aumento de los materiales de hormigón, en la medida que la deconstrucción sea selectiva en origen. En las gráficas es posible observar el contenido de impurezas. El contenido de asfalto, afecta a la resistencia a compresión del hormigón, llegando a reducirla en un 30% cuando el 30% del volumen de árido reciclado es asfalto (Hansen, 1986). Por ello, su contenido suele limitarse a 1% para áridos reciclados en hormigón (Ministerio de Fomento de España, 2008). El contenido de vidrio es potencialmente perjudicial para el hormigón, por las reacciones álcali-árido que pueden presentarse, y por otro lado, el contenido en yeso puede generar

reacciones expansivas (Nixon, 1978). Finalmente, el límite en el contenido de cloruros es igual que para los áridos naturales (Hansen, 1992).

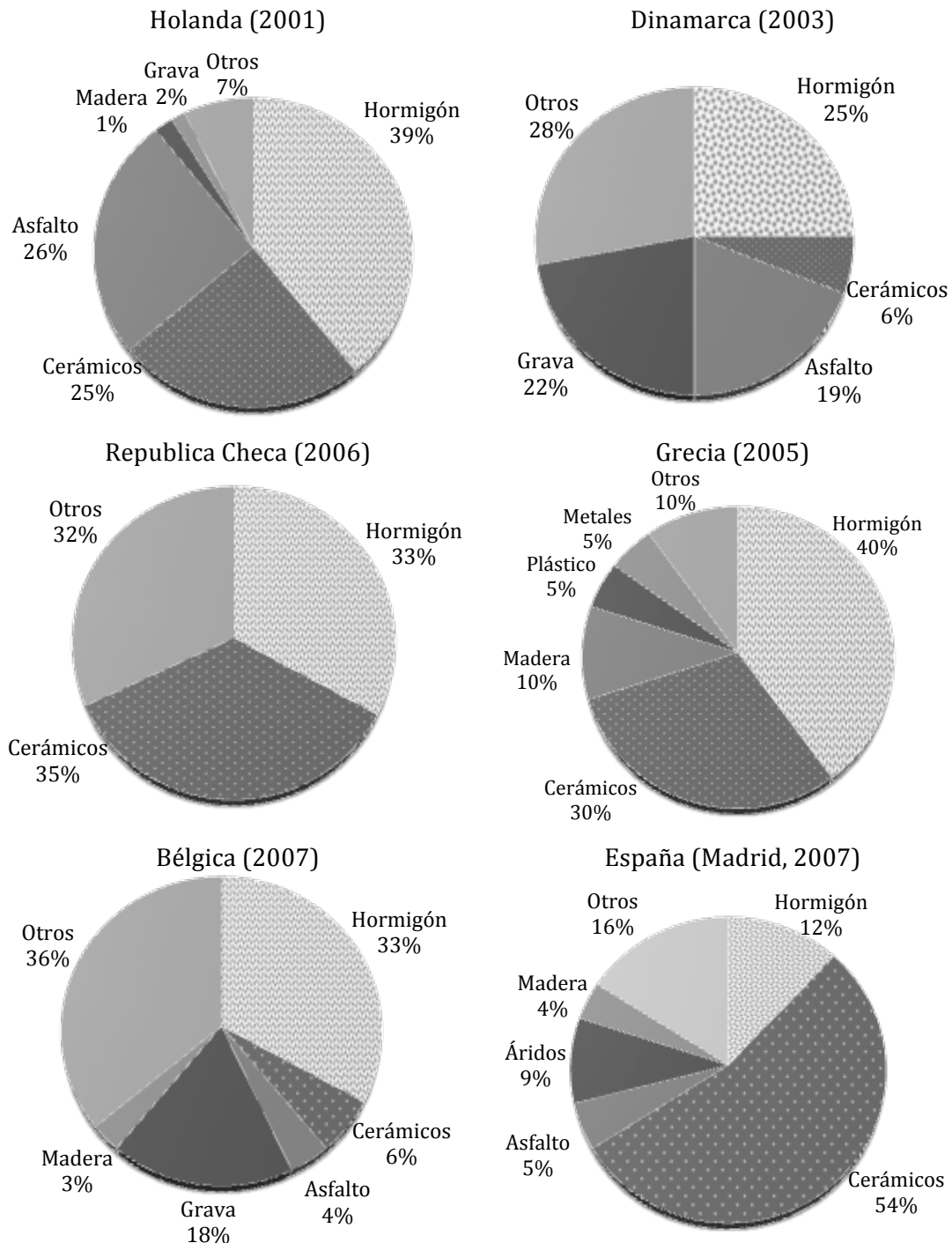


Figura 2.2. Composición típica de Residuos de Construcción y Demolición RCD en algunas ciudades Europeas (Holanda, Dinamarca, Republica Checa, Bélgica (Böhmer *et ál.*, 2008), Grecia (Oikonomou, 2005), España (Consejería de Medio Ambiente, y Ordenación del Territorio, 2006-2016)).

2.1.1 Clasificación de los áridos reciclados

Debido a la amplia gama de áridos reciclados que puede ofrecer el mercado, desde hace algunos años se han establecido clasificaciones según sus compuestos, sus características o sus aplicaciones. La RILEM, organismo internacional de referencia en materiales de construcción, propone en su recomendación (RILEM, 1994), una clasificación que contempla tres categorías generales para los áridos gruesos reciclados (>4mm) definiendo las características que presenta cada tipo (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Propiedades de los áridos reciclados según el tipo (RILEM, 1994).

Característica	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Densidad seca mínima (kg/m ³)	1500	2000	2400
Máxima absorción de agua (%)	20	10	3
Contenido máximo de impurezas (vidrio, asfalto, etc.) (%)	5	1	1
Contenido máximo de metales (%)	1	1	1
Contenido máximo de materia orgánica (%)	1	0,5	0,5
Contenido máximo de finos (<0,063 mm) (%)	3	2	2
Contenido máximo de arena (%)	5	5	5
Contenido máximo de sulfatos (%)	1	1	1
Tipo I	Áridos procedentes mayoritariamente de escombros de albañilería (ladrillo).		
Tipo II	Áridos procedentes mayoritariamente de escombros de hormigón.		
Tipo III	Mezcla de, como mínimo, un 80% de árido natural, y áridos reciclados.		

La norma DIN_4226-100, 2002, recomendación alemana sobre el uso de áridos reciclados, define cuatro categorías estableciendo también valores característicos de densidad y absorción presentados en la tabla 2.4.

La norma UNE-EN_12620, 2009 establece que deben determinarse las proporciones de los materiales componentes de los áridos gruesos reciclados siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN_933-11, 2009, estableciendo categorías según la cantidad de cada material presente.

Tabla 2.4. Clasificación de los áridos reciclados (DIN_4226-100, 2002).

Constituyentes (% peso)	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Áridos naturales y de hormigón (DIN 4226-1)	≥ 90	≥ 70	≤ 20	
Clinker, ladrillos arcilla no porosos			≥ 80	≥ 80
Ladrillos de silicato cálcico	≤ 10	≤ 30	≤ 5	
Otros materiales minerales	≤ 2	≤ 3	≤ 5	
Asfalto	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 20
Impurezas (vidrio, plástico, metal, madera, etc.)	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 1
Densidad (kg/m ³)	≥ 2000	≥ 2000	≥ 1800	≥ 1500
Máx. cap. de absorción después de 10 min. (%)	10	15	20	S/limite

En la Tabla 2.5 se presenta la categoría para áridos reciclados gruesos según el contenido de componentes de hormigón y de piedra natural (Rc y Ru). La norma establece categorías para todos los componentes, definiéndolos como:

- Rc-** Hormigón, productos de hormigón, mortero, unidades de albañilería de hormigón
- Ru-** Áridos no tratados, piedra natural y áridos tratados con conglomerantes hidráulicos
- Rb-** Unidades de albañilería de arcilla (ladrillos, tejas)
- Ra-** Materiales bituminosos
- Rg-** Vidrio
- X-** Otros: arcilla, metales, ladera, plástico, caucho, yeso, etc.

Tabla 2.5. Sección de la tabla 20 de la norma UNE-EN_12620, 2009, para áridos reciclados gruesos.

Componente	Contenido (porcentaje en masa)	Categoría
Rc+Ru	≥ 95	<i>RCU₉₅</i>
	≥ 90	<i>RCU₉₀</i>
	≥ 70	<i>RCU₇₀</i>
	≥ 50	<i>RCU₅₀</i>
	< 50	<i>RCU declarado</i>
	Sin requisitos	<i>RCU_{NR}</i>

Por su parte la Guía Española de Áridos Reciclados (GEAR project, 2011), también presenta una clasificación del árido reciclado según sus componentes como se presenta en Tabla 2.6 y establece en sus recomendaciones valores para las propiedades de los áridos reciclados según las exigencias de su aplicación.

Tabla 2.6. Clasificación de áridos reciclados según su composición (GEAR project, 2011).

Categoría	Cantidad de elementos (% del peso total)				
	Ru (Productos pétreos)	Rc (Elementos hormigón y mortero)	Rb (Elementos cerámicos)	Ra (asfalto)	X (Contenido de otros elementos)
Ar H	≥ 90%		≤ 10%	≤ 5%	≤ 1%
ArM H	≥ 70%		≤ 30%	≤ 5%	≤ 1%
ArM C	< 70%		> 30%	≤ 5%	≤ 1%
ArM A	-		-	5%-30%	≤ 1%

En la Figura 2.3 se observa el aspecto que presentan los áridos reciclados según su composición, donde evidentemente la cantidad de material cerámico aporta un color predominante, aunque en ocasiones solo se trata de cantidades cercanas al 20% (ArM H).



Ar H



ArM H



ArM C

Figura 2.3. Aspecto de distintos tipos de árido reciclado.

Algunos investigadores establecen también establecen clasificaciones. Se presenta en la Tabla 2.7 una clasificación según los valores de las propiedades de áridos

reciclados producidos en Hong Kong que fue realizada por Tam, donde el tipo de árido A representa un árido de alta calidad y el tipo G un árido de muy baja calidad.

Tabla 2.7. Clasificación de áridos reciclados (Tam & Tam, 2007).

Propiedad	Tipo de árido						
	A	B	C	D	E	F	G
Densidad (Kg/m ³)	>2,5	2,49-2,4	2,39-2,3	2,29-2,2	2,19-2,1	2,09-2,0	< 2,0
Absorción de agua (%)	< 1	1,1-3,0	3,1-5,0	5,1-7,0	7,1-9,0	9,1-10,0	> 10
Modulo de finura (%)	< 8	9-16	17-22	23-28	29-34	35-40	> 40
Fragmentación L.A. (%)	< 20	21-23	24-26	27-28	29-31	32-35	> 35
Contenido en Cloruro (%)	< 0,015	0,016-0,03	0,031-0,05	0,051-0,10	0,101-0,50	0,501-1,0	> 1
Contenido en Sulfato(%)	< 0,015	0,016-0,03	0,031-0,05	0,051-0,10	0,101-0,50	0,501-1,0	> 1

2.1.2 Producción de áridos reciclados

La producción de áridos reciclados empieza con la deconstrucción de las estructuras. Un proceso de deconstrucción selectiva es fundamental para disminuir la presencia de impurezas en los escombros, posteriormente éstos serán sometidos a un proceso de transformación y valorización para obtener productos reciclados de distintas características y calidades.

En la Figura 2.4 se describe un proceso habitual al que son sometidos los Residuos de Construcción y Deconstrucción RCD. La necesidad de establecer un proceso específico depende de las características deseadas para el producto final, ya que gran parte de la calidad del árido reciclado depende del tipo y nivel de trituración al que es sometido el RCD.

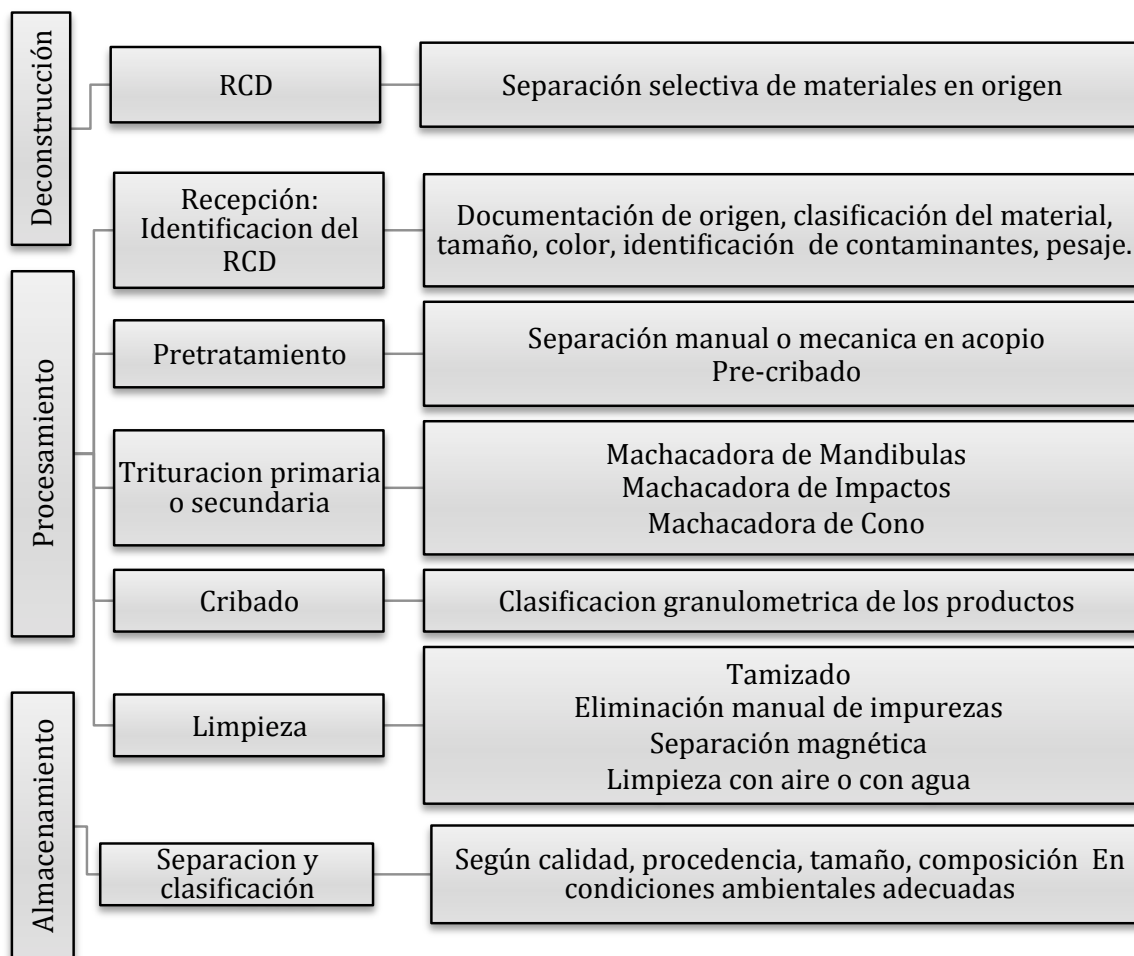


Figura 2.4. Etapas de producción de áridos reciclados

Las plantas de gestión de residuos se pueden clasificar según la tecnología que emplean y según su capacidad de desplazamiento. Respecto a su capacidad de desplazamiento se clasifican en móviles, semi-móviles y fijas (Figura 2.5). En el diagnóstico de la situación del reciclaje en España, llevado a cabo durante el proyecto GEAR (GEAR project, 2011), se encontró que un 12% de las plantas de gestión de residuos son móviles, es decir que se trasladan directamente a la obra para realizar el proceso, mientras que las plantas clasificadas como semi-móviles corresponden a un 39% y son aquellas que aunque se llevan a la obra también operan en un emplazamiento fijo y normalmente son más grandes que las móviles. Finalmente un 49% de las plantas de gestión de residuos son fijas, es decir se

encuentran en un emplazamiento permanente y proporcionan la mayor gama de capacidad.



Figura 2.5. Plantas de gestión de residuos en España. a) Móvil. b) Semi- móvil. c) Fija.

Respecto a la tecnología que empleen en el tratamiento de los RCD se suelen clasificar como plantas de primera, segunda y tercera generación. Dentro de las plantas de primera generación se incluyen las que poseen el nivel tecnológico más simple, carecen de mecanismos de eliminación de contaminantes a excepción del acero y otros elementos mecánicos. Las plantas de segunda generación cuentan además con mecanismos mecánicos o manuales de eliminación de contaminantes previos al machaqueo, elementos de limpieza y clasificación del producto machacado por vía seca o húmeda. Por último las de tercera generación hacen referencia a las más tecnológicas, están dirigidas a una reutilización prácticamente integral de otros materiales secundarios. Como resumen de los equipos presentes en los diferentes niveles tecnológicos, en la Figura 2.6 se presenta un diagrama en el que a cada nivel tecnológico se le asignan los procesos correspondientes y aparece un Nivel 4, del que no se vislumbra una aplicación inmediata en España y que recupera materiales o elementos como materia prima mediante tecnificados procesos industriales (Bustillo, 2010).

La etapa de trituración, es un factor determinante en la calidad del árido reciclado. En el caso de los áridos reciclados de hormigón según el sistema de trituración que se ejecute, evidentemente el árido reciclado tendrá mayor o menor pasta del mortero antiguo adherido al árido natural antiguo (Yagishita *et ál.*, 1994), lo que será determinante en su calidad. En la Figura 2.7 se observan las machacadoras más comunes para la trituración primaria y secundaria. Cuando la trituración se hace con una machacadora de impacto, la cantidad de árido reciclado sin pasta del

mortero antiguo adherida es mayor y la calidad del producto es buena de acuerdo con las características físicas exigidas a este tipo de material para emplear en la fabricación de hormigón (Etxeberria (b) *et ál.*, 2007).

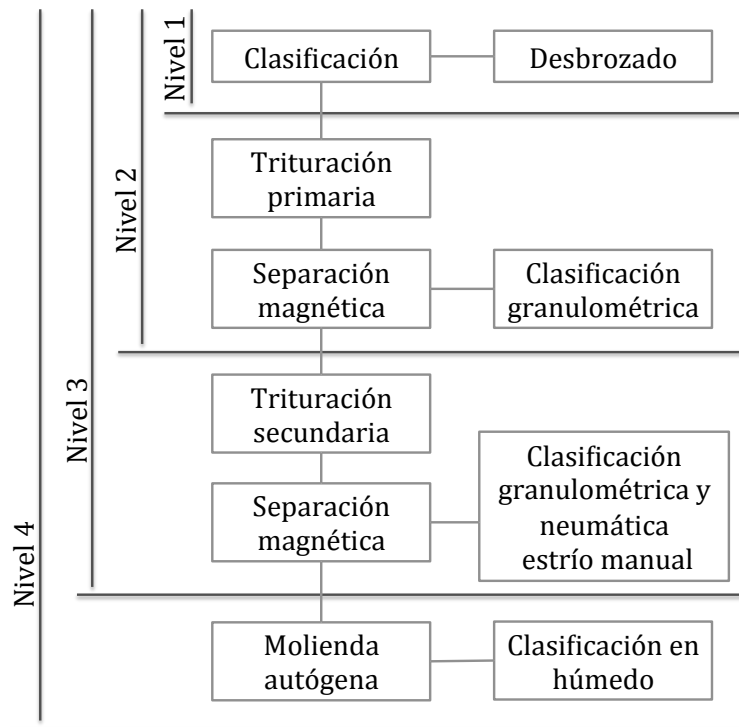


Figura 2.6. Niveles tecnológicos y procesos asociados (Bustillo, 2010).

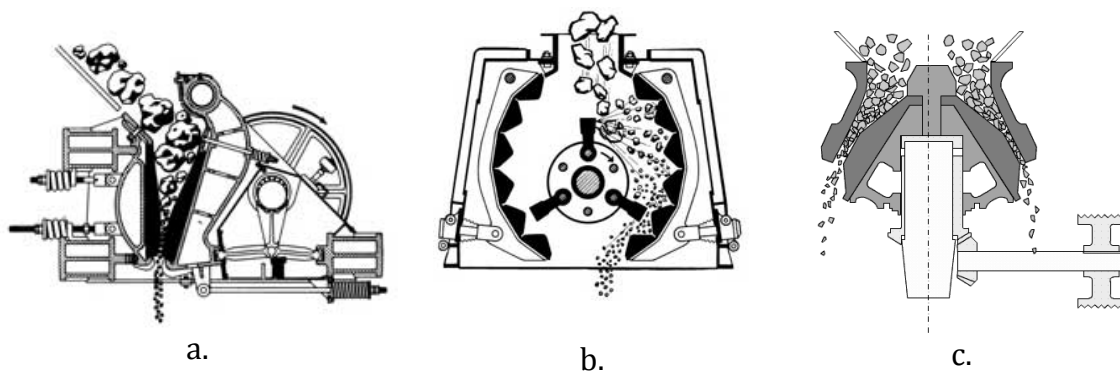


Figura 2.7. Sistemas de trituración a) Machacadora de Mandíbula, b) Machacadora de Impacto, c) Machacadora de Cono.

También existen otros tratamientos que permiten obtener áridos de muy buena calidad, eliminando casi todo el mortero adherido al árido, dejándolo casi como un árido natural. Estos procesos combinan la acción térmica con la acción mecánica, lo cual permite obtener áridos con una fracción de mortero adherido menor al 5% y una reutilización completa de los RCD, cerrando efectivamente el ciclo en la producción de hormigón (Mulder *et ál.*, 2007).

2.1.3 Aplicación de los áridos reciclados

Se producen áridos reciclados con distintas propiedades que pueden ser empleados para una amplia gama de aplicaciones y usos en el campo de la construcción, en ámbitos muy variados según el nivel de exigencia del tipo de aplicación para el que sea utilizado (Figura 2.8).

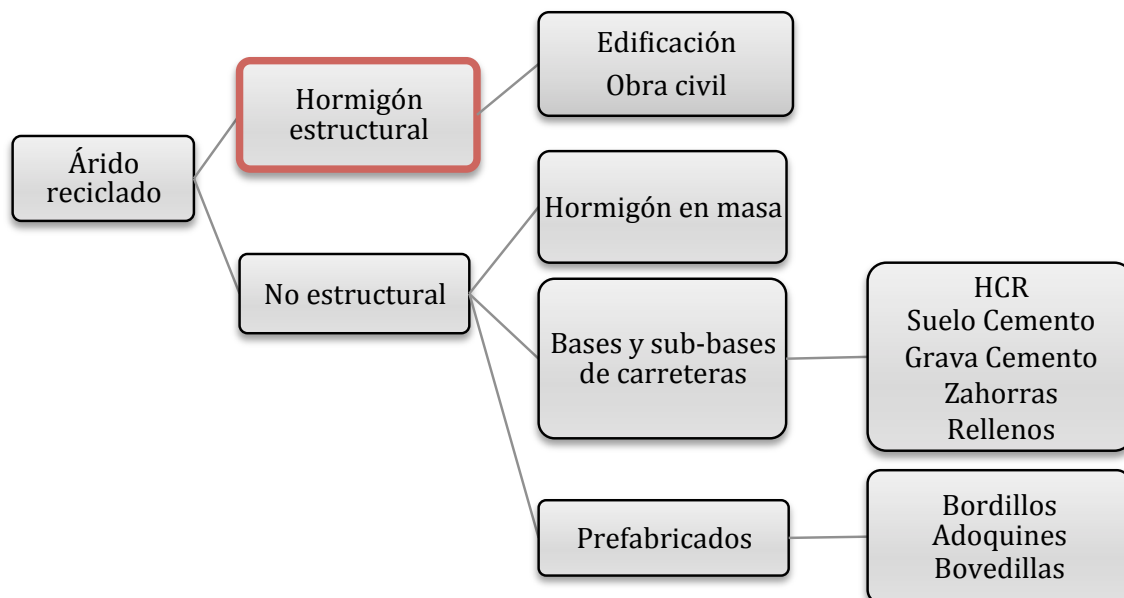


Figura 2.8. Aplicaciones para el árido reciclado.

Los destinos de estos materiales reciclados dependerán de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. Así, mientras que para explanaciones se suelen utilizar materiales procedentes tanto de residuos cerámicos, como de asfalto, de hormigón o mezclas de estos, para otras aplicaciones más restrictivas,

como la fabricación de hormigón, los materiales reciclados suelen proceder de residuos de hormigón o en algunos casos de mezcla de residuos de hormigón y cerámicos.

Para aplicaciones de hormigón a nivel estructural pueden emplearse áridos reciclados de hormigón (ArH) y áridos reciclados mixtos (ArMh), manteniéndose los criterios de dosificación para hormigones con árido natural, aunque en el caso de utilizar áridos reciclados mixtos el contenido de cemento en la mezcla para una misma capacidad resistente puede aumentar hasta un 20% respecto a un hormigón con áridos naturales.

Distintos tipos de construcciones en edificación y obra civil se han realizado en países como Alemania, Bélgica, Reino Unido, Dinamarca, Australia o Japón.

2.1.4 Propiedades del árido reciclado

Las propiedades analizadas sobre los áridos reciclados son las mismas que para los áridos naturales (Sánchez, 2004), por lo tanto, deben ser sometidos a ensayos de: granulometría, densidad, absorción, coeficiente de los Ángeles, contenido en cloruros, sulfatos, materia orgánica, entre otras.

Además, debido a la gran heterogeneidad de los áridos reciclados y a que su calidad y propiedades, dependen de importantes factores, como el tamaño del árido (fracción fina o gruesa), la calidad del hormigón de origen y la técnica de procesamiento (Hansen & Narud, 1983; Sánchez, 2004; Tabsh & Abdelfatah, 2009) se deben realizar ensayos adicionales, algunos normalizados y otros desarrollados en la bibliografía, que son de gran importancia para caracterizar completamente los áridos reciclados que estarán presentes en el hormigón. De esta manera se debe evaluar:

1. Contenido en mortero adherido (Barra M., 1996)
2. Composición y Contenido en impurezas (UNE-EN_933-11, 2009)
3. Contenido en álcalis

En la literatura sobre las propiedades de los áridos reciclados, se resalta su mayor capacidad de absorción, su menor densidad (Nixon, 1978; Topcu & Güncan, 1995; Barra & Vázquez, 1998; Limbachiya *et ál.*, 2000), su menor resistencia a la fragmentación (mayor coeficiente de los ángulos) y su contenido alto en sulfatos (Sánchez & Alaejos, 2009).

La principal diferencia respecto a un árido natural, es la pasta de cemento que después del proceso de tratamiento ha quedado adherida al árido original (mortero adherido, Figura 2.9), caracterizada por su alta porosidad, su angulosidad, su rugosidad y de propiedades desconocidas normalmente.

sin embargo, la durabilidad de los áridos reciclados puede llegar a ser mejor que la de los áridos naturales (Hansen, 1986). Estas conclusiones contradictorias pueden ser debidas al tipo de ensayo realizado, que no siempre es el adecuado (Kasai, 1985).

El árido reciclado de mayor tamaño tiene en general mayor densidad y menor absorción, razón por la cual se recomienda limitar el uso de los áridos reciclados a la fracción gruesa (> 4mm)

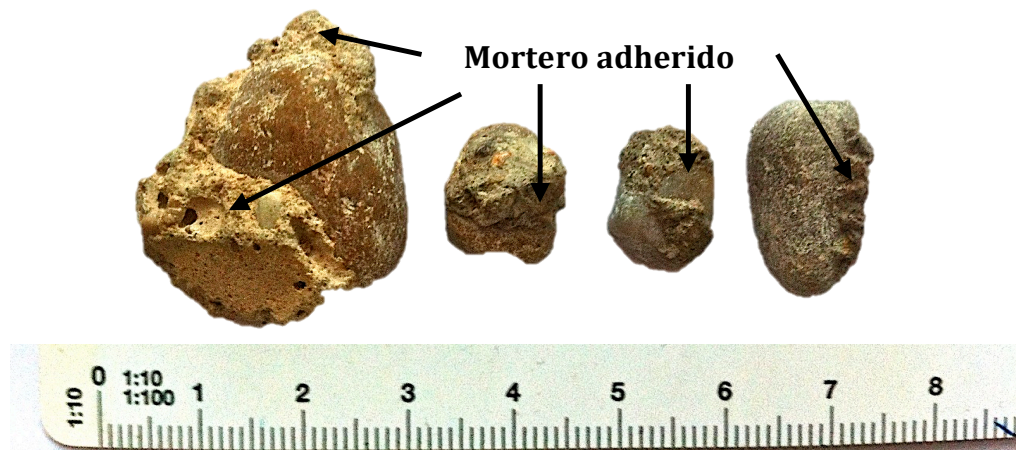


Figura 2.9. Áridos reciclados de hormigón con mortero adherido.

Por el procedimiento de obtención del árido reciclado se obtiene un árido con mayor tamaño, mayor densidad y menor absorción, razón por la cual se recomienda limitar el uso de los áridos reciclados a la fracción gruesa (>4mm).

En general, la **capacidad de absorción** del árido reciclado puede encontrarse en un rango de valores entre 3% y 12% (Katz, 2003) y está directamente relacionada con el tamaño del árido reciclado. La normativa Japonesa (BCSJ, 1977), prescribe que un árido reciclado puede ser utilizado en la producción de hormigón, si su máxima capacidad de absorción es 7% para la fracción gruesa y 13% para la fracción fina. La instrucción de Hormigón española, limita también la absorción del árido grueso reciclado al 7%, aunque al mezclarse con la proporción de árido natural no deben superar el 5% (Ministerio de Fomento de España, 2008). Se estima que durante los primeros 10 minutos los áridos absorben el 80% de su capacidad a 24 horas (entre un 65% y un 90% (Sánchez, 2004)), aunque otros estiman que un 80% de la absorción del árido reciclado puede darse en las primeras 5h (Tam *et ál.*, 2008).

La **densidad** del árido reciclado es entre 4% y 12% menor que un árido natural y depende del tipo de árido reciclado, de la cantidad de mortero adherido y de los materiales que lo conforman (Hansen & Narud, 198; Ravindrarajah & Tam, 1985; Limbachiya *et ál.*, 2000). Para el caso de la fracción gruesa de áridos reciclados de hormigón, los valores de densidad seca están entre 2120 y 2430 kg/m³ (BCSJ, 1978), aunque (Sánchez, 2004) amplía el rango según la bibliografía recopilada a valores entre 2070 y 2650 kg/m³.

En la Tabla 2.8 se presentan los límites establecidos en la instrucción española EHE-08 para las propiedades de los áridos reciclados para hormigón.

Tabla 2.8. Límites establecidos en la EHE (Ministerio de Fomento de España, 2008) sobre las propiedades de los áridos reciclados para hormigón (20 % sustitución).

Propiedad	Norma	Recomendación
Granulometría		
Absorción (y Densidad)	UNE-EN 933-1	4/20 mm
Coefficiente Los Ángeles	UNE-EN 1097-6	< 7%
Componentes de los áridos gruesos	UNE-EN 1097-2 UNE 933-11	< 40 (Rc+Ru ≥ 90%)

Respecto a la **resistencia a la fragmentación**, el árido reciclado obtiene mayores valores del coeficiente de los ángeles, influenciado por la resistencia del hormigón de origen, el proceso de trituración y el tamaño del árido (Hansen & Narud, 1983;

Sagoe-Crentsil *et ál.*, 2001; Topçu & Sengel, 2004; Tabsh & Abdelfatah, 2009) en un rango entre 12% y 43% (Sánchez & Alaejos, 2009).

2.1.4.1. Mortero adherido

La diferencia en las propiedades del árido reciclado puede variar según la cantidad de mortero adherido al árido natural antiguo después de los procesos de trituración (Hansen, 1992). La cantidad de mortero adherido varía según la fracción analizada y tiende a aumentar para las fracciones más finas. El rango de valores sobre la cantidad de mortero adherido de un árido reciclado encontrado en la bibliografía, es muy amplio debido además de la heterogeneidad, el tamaño, el proceso de trituración y el origen, al tipo de ensayo utilizado, ya que no existe una norma estandarizada que permita determinar esta propiedad. Valores habituales entre 25%-60% (Hansen & Narud, 1983; Abbas *et ál.*, 2009; Sánchez & Alaejos, 2009), han sido encontrados, sin embargo, según el tipo de ensayo empleado se observan valores entre 8% - 70% (Sánchez, 2004).

A continuación se describen brevemente algunos métodos para determinar el contenido de mortero adherido:

Tratamiento con ácido

El tratamiento consiste en sumergir los áridos en una solución de ácido clorhídrico (HCl), (Yagishita *et ál.*, 1994) (Tam *et ál.*, 2007), para diluir la pasta de cemento adherida, lo cual puede afectar a los áridos de procedencia caliza. El método consiste en el uso de un ácido, ya sea clorhídrico (HCl), sulfúrico H_2SO_4 , o fosfórico H_3PO_4 , con una concentración aproximada de 0.1 mol para eliminar la capa de mortero adherido. Un esquema del procedimiento se presenta en la Figura 2.10.

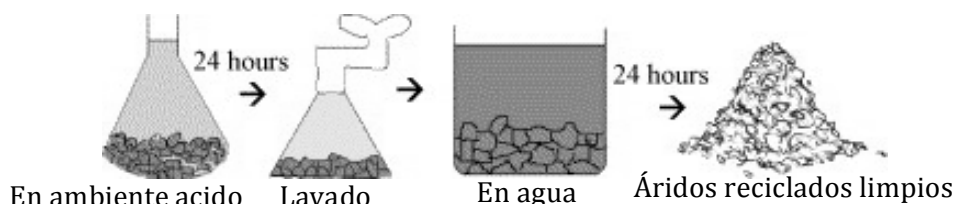


Figura 2.10. Tratamiento con ácido para la disolución del mortero adherido (Tam *et ál.*, 2007).

Fabricación de un Nuevo Hormigón

Es un método más largo. Obliga a la fabricación de un nuevo hormigón con cemento blanco o de color que permita diferenciar la pasta nueva del mortero adherido antiguo (Hansen & Narud, 1983; Ravindrarajah & Tam, 1985). Para la evaluación del volumen las probetas se cortan en rebanadas y se pulen las caras. Los resultados son orientativos al estimar el mortero a partir de la media de la superficie que éste ocupa. El mortero adherido al árido reciclado, puede ser cuantificado por medio del análisis de imágenes (Abbas *et ál.*, 2009), por lo que es necesario obtener buenas fotografías digitales, para cada fracción de árido reciclado, posteriormente mediante un software (Binarization Image Processor BIP), la imagen digital es convertida a una imagen en blanco y negro o en colores que permiten su fragmentación y cuantificación. En la Figura 2.11 se observan detalles del procedimiento desde el momento en que se pule la superficie hasta los resultados del análisis de imágenes, donde es posible observar la separación exitosa de los segmentos de árido antiguo, mortero adherido y pasta nueva.

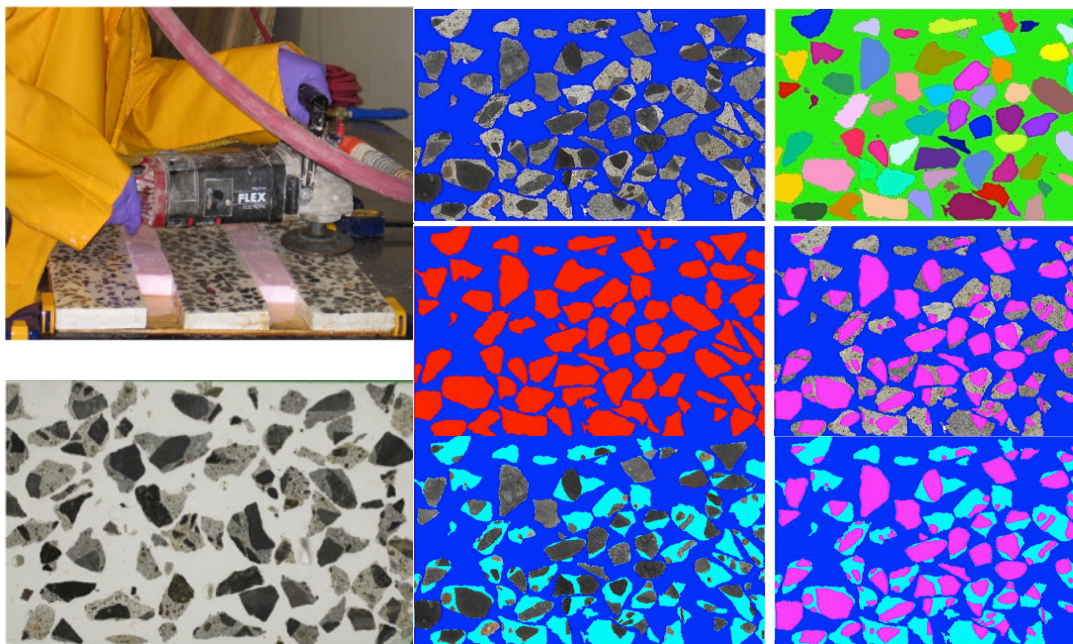


Figura 2.11. Análisis de imágenes para una fracción de árido reciclado (Abbas, *et ál.*, 2009).

Tratamiento Térmico

Es un método en el que el árido es sometido a cambios bruscos de temperatura, para producir una separación del mortero adherido de tipo físico (Barra M., 1996). Es aplicable a cualquier tipo de árido, sin importar su naturaleza de origen.

El procedimiento consiste en saturar en agua fría el mortero adherido a los áridos, posteriormente son sometidos a 500°C en la mufla, consiguiendo una rápida evaporación del agua que ocupa los poros y creando tensiones en el mortero que facilitan su separación. Luego se sumerge en agua fría y el cambio brusco de temperatura provoca unas tensiones en el mortero que producen su desagregación y facilitan su separación mediante el uso de un martillo de goma que permite terminar de separar el mortero sin romper el árido.

Hielo-Deshielo

El método combina la acción química y mecánica para desintegrar el mortero adherido al árido reciclado y separar así los áridos naturales de origen (Abbas *et ál.*, 2008). Las tensiones mecánicas se dan al someter al árido reciclado a la acción de ciclos de hielo - deshielo, mientras que la degradación química se logra a través de la exposición de éste a una solución de sulfato de sodio. Después de 24 horas a 105° C en el horno, la muestra es sumergida 24h en una solución con 26% en peso de sulfato de sodio y sometida a cinco ciclos diarios de hielo - deshielo (16h a -17°C y 8h a 80 °C). Se recomienda el uso de un martillo de goma para eliminar el mortero restante después del último ciclo. Aunque se estima que éste método elimina entre 80% y 90% del mortero adherido de las fracciones de mayor tamaño (16 mm y 20 mm), lo cual es más que el método basado solo en la disolución de ácido nítrico, aún no llega a una eliminación total (Butler *et ál.*, 2011).

El método de tratamiento térmico (Barra, 1996), es un método válido para cuantificar el mortero adherido sobre cualquier tipo de árido reciclado, además su

procedimiento es fácil de realizar (Sánchez & Alaejos, 2009) y llega a ser más efectivo que otros métodos (Butler *et ál.*, 2011).

En la Figura 2.12 se presentan algunos valores de mortero adherido, según el tamaño de fracción ensayada por los distintos métodos y se observa que el rango del porcentaje de mortero adherido encontrado es amplio. El método de tratamiento térmico para áridos reciclados de tamaño entre 8 y 20mm presenta valores entre 20 y 50% con una menor dispersión.

Un árido reciclado con una calidad adecuada para ser utilizado en hormigón debe tener una cantidad de mortero adherido menor al 40% (Topçu & Sengel, 2004). Para obtener un hormigón con una resistencia de por lo menos 25 N/mm², la cantidad de mortero adherido debe situarse por debajo de 44%, éste valor permite garantizar características del árido como su densidad, mayor que 2160 kg/m³, su absorción menor que 8% y su coeficiente de los ángulos menor de 40% (Sánchez & Alaejos, 2009).

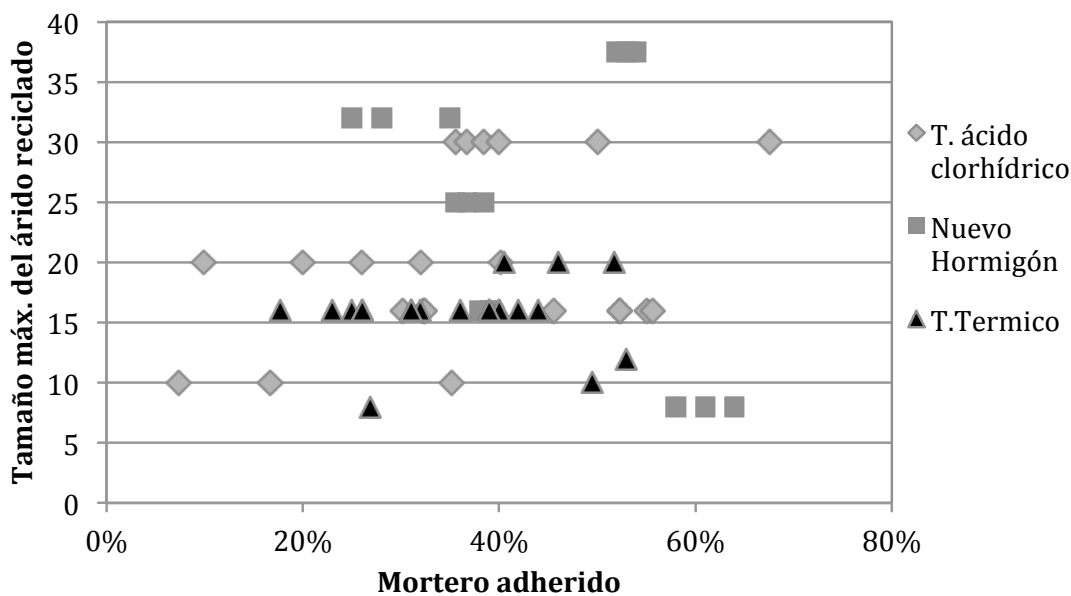


Figura 2.12. Relación entre el contenido de mortero adherido y el tamaño máximo del árido para los diferentes métodos de ensayo.

2.1.4.2. Contaminantes e impurezas

Frecuentemente los áridos reciclados pueden incorporar impurezas y contaminantes como plástico, madera, yeso, ladrillo, materia orgánica, asfalto, etc., que influyen negativamente en las propiedades del hormigón induciendo a un descenso en su resistencia, por lo que distintas normativas y recomendaciones limitan el contenido de impurezas en áridos reciclados para hormigón (Tabla 2.9). Independientemente del límite de impurezas, la instrucción EHE-08 establece que la combinación de árido natural y árido reciclado en el hormigón, cumpla las especificaciones que en el articulado se exige a un árido natural.

Tabla 2.9. Máximo contenido de impurezas en el árido reciclado.

Impurezas	Max. contenido de impurezas % del peso total de la muestra			
	RILEM, 1994	BRE, 1998	BS 8500, 2002	EHE, 2008
Asfalto	1		5	1
Material cerámico			5	5
Partículas ligeras		0,5	0,5	1
Otras impurezas (vidrio, plásticos, metales, etc.)	1	1	1	1

Además de reducir las resistencias, dependiendo del tipo de impurezas se pueden presentar otros problemas perjudiciales (Sánchez & Alaejos, 2006):

- El vidrio favorece la reacción álcali-árido y su separación resulta difícil ya que su densidad es similar a la del árido.
- El yeso puede originar ataque por sulfatos.
- La madera y el papel son inestables a los ciclos humedad-sequedad y hielo-deshielo produciendo desconchados superficiales.
- Las pinturas ocluyen aire en el hormigón.
- Los suelos arcillosos aumentan la demanda de agua y originan mayor retracción en el hormigón.
- Las partículas de ladrillo pueden empeorar el comportamiento hielo-deshielo, en algunos casos también pueden generar fenómenos expansivos.

- La presencia de metales puede producir manchas superficiales debidas a la oxidación, especialmente cuando existe un elevado contenido de cloruros.

La norma UNE-EN_933-11, 2009 es utilizada para determinar la cantidad y tipo de componentes del árido reciclado para categorizarlo o clasificarlo, como se presentó en el apartado (2.1.1).

2.1.4.3. Contenido en álcalis

Algunos áridos pueden reaccionar con los álcalis del cemento en un ambiente húmedo cuando el contenido de alcalinos en el hormigón es elevado, dando lugar a un compuesto gelatinoso que produce expansiones en el hormigón.

Los RCD procesados en las plantas de reciclaje pueden provenir de estructuras que fueron atacadas por reacciones álcali-árido o que eran potencialmente reactivas, pero no reaccionaron debido a una carencia de condiciones favorables (humedad).

La utilización de árido reciclado puede favorecer estas reacciones al incorporar un mayor contenido de alcalinos debido al mortero que llevan adherido, por lo que puede ser considerado potencialmente reactivo (BRE, 1998). El nuevo hormigón reciclado puede generar un ambiente propicio para el desarrollo de reacciones álcali-árido.

La utilización de cementos con adiciones disminuye el riesgo de reacción álcali-árido, debido a que estos hormigones son generalmente más impermeables. Ante la dificultad sobre el control del origen del árido reciclado, la recomendación japonesa considera conveniente el uso de éste tipo de cementos en hormigones con árido reciclado (Sánchez & Alaejos, 2006).

2.2 Dosificación y fabricación de hormigones con árido reciclado

La dosificación del hormigón con árido reciclado puede realizarse de manera similar que para un hormigón con áridos naturales (Sánchez, 2004; López-Gayarre, 2008). Algunos investigadores han realizado análisis estadísticos sobre el hormigón con árido reciclado para obtener la mezcla óptima, encontrando que con una relación a/c 0,5, consistencia de 180 mm, arena natural y una sustitución de 42% de árido grueso natural por reciclado, se obtiene un hormigón para uso estructural con características equivalentes a un hormigón con árido natural (Lin *et ál.*, 2004).

Es importante tener en cuenta que sobre la dosificación de los hormigones intervienen factores como, el porcentaje de sustitución de árido reciclado y el agua total en la mezcla (Barra & Vázquez, 1996; Pelufo *et ál.*, 2009; Ulloa *et ál.*, 2009). Además durante la fabricación, el momento en que son introducidos los áridos reciclados en la mezcla y sus condiciones de humedad en ese instante pueden influir sobre las propiedades del hormigón reciclado (Etxeberria (b) *et ál.*, 2007).

2.2.1 Contenido de agua

La fabricación de hormigón con árido reciclado requiere un mayor contenido de agua respecto a un hormigón con árido natural convencional para obtener una misma consistencia. Se estima que el incremento de agua puede situarse entorno a un 5% -10%, aunque puede aumentar un 15% si se utilizan áridos reciclados gruesos y finos (Hansen, 1992).

El aumento en el contenido de agua del hormigón se puede llevar a cabo incrementando el agua de amasado o utilizando el árido saturado. La utilización del árido completamente saturado (saturado superficie seca) plantea un problema para las plantas de fabricación, además no hay un acuerdo en cuanto al tiempo de contacto de los áridos reciclados con el agua, algunos autores lo sumergen 24 horas para luego secarlo superficialmente (Rasheeduzzafar, 1984), otros lo

mantienen sumergido una hora e incluso para algunos sumergirlo 10 minutos es suficiente (Sagoe-Crentsil *et ál.*, 2001). Es importante conocer la humedad y absorción de los áridos para cuantificar el agua presente en el hormigón.

Aunque no existe un criterio generalizado, la mayoría de los investigadores recomiendan saturar el árido reciclado antes de ser empleado en la fabricación de hormigón, para evitar que éste absorba el agua de la pasta (Nealen & Schenk, 1998) y el hormigón no pierda trabajabilidad en estado fresco, con la idea de controlar la relación a/c. Sin embargo, después de la saturación el tiempo de escurrimiento puede no ser suficiente, quedando una película de agua en la superficie de los áridos reciclados y generando un proceso extra en su fabricación a nivel industrial, que posiblemente no se realice correctamente.

Estudios desarrollados por Poon *et ál.*, (2004), abalan el hecho de utilizar los áridos reciclados en el estado en que son recibidos para ser introducidos en la mezcla, recomendando sustituciones de árido reciclado máximo del 50% para obtener una resistencia adecuada en la producción de hormigón. Cuando los áridos reciclados presentan una humedad inicial moderada, la relación agua/cemento en la zona de transición es baja, a tempranas edades de hidratación, favoreciendo la unión entre el árido y la pasta de cemento hidratada (Poon *et ál.*, 2004). Por el contrario, la utilización de áridos reciclados saturados tienen un efecto negativo sobre la zona de transición debido un incremento en la relación agua/cemento y por tanto una disminución en el desempeño mecánico del hormigón (Barra & Vázquez, 1998).

Ettxeberria *et ál.*, (2007) en su estudio humedece los áridos a manera de riego, un día antes de la fabricación del hormigón y los cubre con un plástico para mantener alta su humedad, obteniendo buenos resultados sobre las propiedades del hormigón. En general es importante e interesante definir el estado de humedad en que se deben ser introducidos los áridos reciclados en la mezcla, ya que hasta propiedades de durabilidad como la resistencia a la acción hielo-deshielo pueden estar sensiblemente influenciadas por este parámetro. Barra & Vázquez, 1996 ha encontrado que el estado semi saturado es el mejor para el comportamiento del hormigón frente a esta propiedad, pero no queremos olvidarnos de lo que requiere ejecutar bien este procedimiento.

Un nivel recomendado de humedad puede ser del 80% de la capacidad de absorción total (Etxeberria M. *et ál.*, 2007), para reducir su capacidad de absorción, sin introducir agua en exceso. En algunos casos, la idea de un riego 24 horas previas al uso de los áridos reciclados, se hace para aumentar y homogenizar la humedad inicial, de manera que absorban una cantidad de agua mínima en el momento de la mezcla, no obstante, tampoco se asegura un valor de agua/cemento con certeza y si requiere un proceso que puede ser limitante para el uso de los áridos reciclados en este campo.

2.2.2 Contenido de Cemento

Al incrementarse la cantidad de agua por el uso de áridos reciclados, también debería incrementarse la cantidad de cemento de manera que la relación a/c se mantenga constante. Este incremento suele ser del orden del 5% para una sustitución del 100% de árido reciclado grueso y puede llegar hasta un 15% si se sustituye totalmente árido reciclado grueso y fino (RILEM, 1994). Para sustituciones de árido reciclado grueso de hasta 30%, no se requiere aumentar la cantidad de cemento para obtener un hormigón con las mismas propiedades que un hormigón con áridos naturales (Bustillo, 2010).

2.2.3 Relación agua/cemento

Para establecer correctamente la relación a/c del hormigón es importante definir los términos agua total, agua efectiva y agua añadida.

La instrucción EHE-08 (Ministerio de Fomento de España, 2008) al referirse a la relación a/c evalúa el agua total en la mezcla, por lo que en los comentarios al artículo 71, apartado 71.3.2.4, define el agua total (a_{tot}) de un hormigón como: la formada por el agua directamente añadida a la amasada, el agua aportada por la humedad de los áridos (tanto de absorción como de agua superficial), el agua que pudiera quedar en la amasadora después del lavado de la misma y el agua que

podieran aportar los aditivos, y es la cantidad que se empleara para determinar la relación a/c del hormigón. Los requisitos que establece la instrucción EHE-08 para la máxima relación a_{tot}/c de un hormigón sometido a un ambiente agresivo de agua de mar se presentan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Requisitos para hormigones sometidos a un ambiente marino según la instrucción EHE-08 (Sección tomada de tabla 37.3.2.a y 37.3.2.b).

Ambiente marino Clase de exposición	Máxima relación a_{tot}/c	Mínimo contenido de cemento (Kg/m³)	Mínima resistencia característica (MPa)
IIIa / zona atmosférica	0,50	300	30
IIIb / zona sumergida	0,50	325	30
IIIc / zona de salpicaduras	0,45	350	35

La norma europea EN 206-1, 2000, parte 1, define en 3.1.29. el contenido total de agua de forma similar a la presentada en la EHE, pero además, en el apartado 3.1.30. define el contenido de agua efectiva (a_{ef}) como: la diferencia entre el agua total presente en el hormigón fresco y el agua absorbida por los áridos. En la sección 3.1.31 define relación a/c como la relación entre el contenido de agua efectiva y el contenido de cemento en el hormigón fresco y lo reafirma en el artículo 5.4.2. En la Tabla 2.11 se presentan los requisitos de la norma EN 206-1, 2000 para las cantidades mínimas de la relación a_{ef}/c y de cemento para una clase de exposición de agua de mar.

Tabla 2.11. Valores limite recomendados para la composición y propiedades del hormigón (Sección tomada de Tabla F.1 EN 206-1).

Requisitos	Clase de exposición		
	Corrosión inducida por cloruros - Agua de mar		
	XS1 zona atmosférica	XS2 /zona sumergida	XS3/ zona salpicaduras
Máxima relación a_{ef}/c	0,50	0,45	0,45
Mínima clase resistente	C 30/37	C 35/45	C 35/45
Mínimo contenido de Cemento (Kg/m ³)	300	320	340

Los límites para la relación a/c para hormigones en ambiente marino localizados en zona atmosférica, en zona de salpicaduras o en carrera de mareas son iguales para la EHE y la EN 206-1, a pesar de que una habla en términos de agua total y la otra en términos de agua efectiva. Las cantidades de cemento también son similares, aunque la EHE tiene exigencias ligeramente mayores.

El Código Modelo CEB-FIP-1990 para hormigón estructural, sigue el mismo criterio que la norma EN 206-1 definiendo en d.3.(17) el contenido de agua efectiva como el agua de amasado más el agua presente con anterioridad en la superficie de los áridos o en los aditivos o adiciones. Para el Código Modelo la relación agua/cemento es la relación en peso del contenido del agua efectiva y el contenido de cemento en el hormigón. El mismo concepto aplican para la relación a/c la norma británica BS 5328: parte 1:1997, Hormigón. Guía para la especificación de Hormigón, la norma ISO/TC71/SC 3, el ACI-104-71 y revisiones posteriores (Martínez Suárez, 2002).

En general cuando se trata de comparar hormigones con árido reciclado con hormigones con árido natural fabricados con igual relación a_{ef}/c , normalmente los hormigones presentan la misma consistencia, sin embargo el hormigón reciclado puede ver reducida su capacidad resistente. Cuando los hormigones se comparan en términos de a_{tot}/c la consistencia del hormigón reciclado es menor, lo cual puede solucionarse con aditivos superplastificantes, pero la resistencia a compresión del hormigón presenta mejores resultados a medida que se incrementa la cantidad de árido reciclado en la mezcla.

2.2.4 Dosificación de áridos reciclados

Como se ha comentado la dosificación de los áridos reciclados en el hormigón puede realizarse de manera similar que para un hormigón con áridos naturales (Sánchez, 2004; López-Gayarre, 2008). Sin embargo algunas investigaciones se desarrollan al respecto ya que teniendo en cuenta que el hormigón con árido reciclado puede tener dos tipos de pasta, la pasta nueva y el mortero antiguo adherido al árido original, se desarrollan métodos que cuantifican el mortero

adherido a los áridos reciclados en la mezcla (Fathifazl *et ál.*, 2007) o que intentan eliminarlo sometiendo a los áridos reciclados a un pre-tratamiento (Tam *et ál.*, 2005; Kong *et ál.*, 2006; Tam *et ál.*, 2007; Li *et ál.*, 2009).

A partir de este enfoque se desarrolla una forma de dosificación de hormigón reciclado con el concepto de Volumen de Mortero equivalente (EMV- equivalent mortar volume) (Fathifazl *et ál.*, 2007). Éste método tiene en cuenta la cantidad relativa al mortero adherido y las propiedades del árido natural antiguo al ajustar en la dosificación las cantidades de árido grueso y el contenido de pasta de la mezcla. No supone, como es habitual, que el árido reciclado se limita a sustituir al árido natural en la mezcla, ya que incrementa el contenido de mortero. La característica principal del método es considerar el mortero adherido como parte del volumen total de mortero del hormigón, asegurando que el volumen total de árido grueso natural (parte reciclado y parte convencional incluido en la mezcla) en el hormigón reciclado es igual al volumen de áridos naturales en un hormigón convencional con las mismas propiedades específicas (Fathifazl G., 2008).

2.2.5 Métodos de fabricación de hormigón con árido reciclado

El proceso de amasado también juega un papel importante en el hormigón con árido reciclados. El tiempo de mezcla y el orden en que son introducidos los materiales en la amasadora puede tener gran influencia en las propiedades del hormigón con árido reciclado.

El módulo granulométrico puede disminuir ligeramente (entre 3-4%) al aumentar el tiempo de mezcla (RILEM, 1992) y el cambio de la granulometría durante el amasado produce una pérdida de fluidez inicial debida a la incorporación de finos. Además las propiedades mecánicas del hormigón aumentan cuando los áridos son mezclados antes de incorporar el agua y el cemento a la amasadora debido a que parte del mortero adherido se separa del árido, lo cual mejora la forma de las partículas y las partículas de cemento liberadas durante la mezcla pueden acelerar la hidratación del cemento (Sánchez, 2004).

Algunos investigadores han analizado procedimientos de fabricación que puede mejorar las propiedades del hormigón con áridos reciclados. En general los procedimientos plantean introducir los áridos antes que el cemento e incorporar el agua a la mezcla en dos etapas (Figura 2.13), para mejorar los procesos de hidratación de manera que la fuerza desarrollada en la nueva interfase es mayor lo cual repercute directamente en las propiedades del hormigón reciclado (Tam *et ál.*, 2009). Se encuentran en la bibliografía métodos como:

- El método de doble mezcla (DM) (Tazawa *et ál.*, 1989),
- El mezclado en dos etapas (TSMA-Two stage mixing approach) (Tam *et ál.*, 2005),
- El método de triple mezcla (TM) (Kong *et ál.*, 2006; Li *et ál.*, 2009),

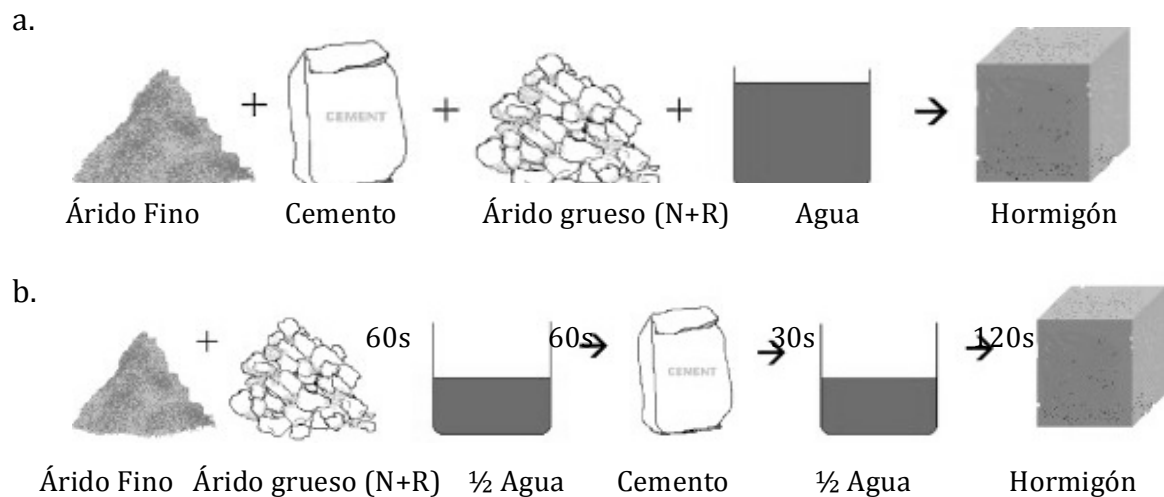


Figura 2.13. Procedimiento de amasado de hormigón. a) Método convencional b) Procedimiento de mezclado en dos etapas TSMA (Tam *et ál.*, 2005).

La diferencia entre los dos primeros (DM y TSMA) radica en los tiempos de mezcla (Otsuki *et ál.*, 2003). Para el método de triple mezcla (TM) los áridos reciclados son revestidos superficialmente por materiales puzalánicos (ceniza volante y humo de sílice), lo cual permite que la porosidad del mortero adherido disminuya y por lo tanto se obtengan hormigones con mejores propiedades mecánicas y de durabilidad (Kong *et ál.*, 2010).

2.3 Propiedades mecánicas del hormigón con áridos reciclados

Las propiedades del hormigón con árido reciclado han sido ampliamente estudiadas. Debido a la heterogeneidad de los áridos reciclados los resultados presentan amplios rangos llegando incluso a ser contradictorios, como puede verse en el breve resumen de la Tabla 2.12 donde se hace referencia a la tendencia del comportamiento, de las propiedades de hormigones con 100% de árido reciclado grueso, respecto a hormigones con árido natural.

Tabla 2.12. Tendencia de las propiedades mecánicas del hormigón con árido reciclado, respecto a un hormigón con árido natural, según los investigadores.

Propiedad	Tendencia del HAR respecto al HAN	Referencias
Resistencia a Compresión	Disminuye (entre 5% - 40%)	(Malhorta, 1976), (Frondistou-Yannas, 1977), (Ravindrarajah & Tam, 1985), (Kakizaki <i>et ál.</i> , 1988) (Hansen, 1992), (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002), (Katz, 2003), (Poon <i>et ál.</i> , 2004), (Poon <i>et ál.</i> , 2004), (Sánchez, 2004), (Topçu & Sengel, 2004), (Tu <i>et ál.</i> , 2006), (Rahal, 2007), (Etxeberria (b) <i>et ál.</i> , 2007), (Tabsh & Abdelfatah, 2009) (Chakradhara <i>et ál.</i> , 2011), (Soutsos <i>et ál.</i> , 2011)
	Se mantiene igual o Aumenta	(Sagoe-Crentsil <i>et ál.</i> , 2001), (Poon <i>et ál.</i> , 2004), (González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2005), (Tabsh & Abdelfatah, 2009), (Domingo <i>et ál.</i> , 2009) (Malašev <i>et ál.</i> , 2010), (Butler <i>et ál.</i> , 2011)
Resistencia a tracción	Disminuye (entre 5% - 25%)	(Hansen, 1992), (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002), (Sánchez, 2004), (Kou <i>et ál.</i> , 2007), (Tabsh & Abdelfatah, 2009), (Chakradhara <i>et ál.</i> , 2011), (Soutsos <i>et ál.</i> , 2011), (Zega & Di Maio, 2011)
	Se mantiene igual o Aumenta	(Ravindrarajah & Tam, 1985), (Sagoe-Crentsil <i>et ál.</i> , 2001), (González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2005), (Etxeberria (b) <i>et ál.</i> , 2007)

Modulo de Elasticidad	Disminuye (entre 15% - 45%)	(Malhorta, 1976), (Frondistou-Yannas, 1977), (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002), (Sánchez, 2004), (Kheder & Al-Windawi, 2005), (Xiao <i>et ál.</i> , 2005), (González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2005), (Rahal, 2007), (Etxeberria (b) <i>et ál.</i> , 2007), (Eguchi <i>et ál.</i> , 2007), (Corinaldesi & Moriconi, 2009), (Berndt, 2009), (Kou <i>et ál.</i> , 2011), (Zega & Di Maio, 2011)
Fluencia y Retracción por secado	Aumenta (hasta un 50%)	(Frondistou-Yannas, 1977), (Ravindrarajah & Tam, 1985), (Hansen T.C., 1986), (Limbachiya <i>et ál.</i> , 2000), (Sagoe-Crentsil <i>et ál.</i> , 2001), (Gomez-Soberon, 2002), (Xiao <i>et ál.</i> , 2005), (Eguchi <i>et ál.</i> , 2007), (Corinaldesi V., 2010)
	Se mantiene igual o Disminuye	(Fathifazl <i>et ál.</i> , 2011)
Adherencia Hormigón/acero	Disminuye	(Eguchi <i>et ál.</i> , 2007), (Butler <i>et ál.</i> , 2011)
	Similar o Aumenta	(Kakizaki <i>et ál.</i> , 1988), (Moriconi & Corinaldesi, 2005), (Xiao & Falkner, 2007), (Corinaldesi & Moriconi, 2009)
Resistencia al fuego	Similar	(Eguchi <i>et ál.</i> , 2007)

Las tendencias contradictorias en los resultados presentados en la tabla anterior son debido a las distintas variables que intervienen en el hormigón y que además, no siempre quedan claras en la bibliografía consultada. Cuando se habla de la relación agua cemento, no todos los investigadores especifican si el agua utilizada que se reporta es agua total o agua efectiva, ni la forma en que los áridos reciclados han sido introducidos en la mezcla: saturados con superficie seca, presaturados, secos o con la humedad natural, lo cual evidentemente influye en los resultados sobre las propiedades del hormigón. Además según la calidad, el tipo del árido y si se ha producido en laboratorio o en una planta, puede presentar una mayor o menor variabilidad.

El uso de árido reciclado fino, afecta en mayor medida las propiedades del hormigón, dando pie a una mayor retracción por secado y una menor durabilidad del hormigón respecto a uno con árido natural, por lo que su utilización para uso estructural generalmente no se recomienda (BCSJ, 1977), (Marinković *et ál.*, 2010).

Sin embargo ya se encuentran resultados más favorables que respaldan el uso de árido reciclado fino en hormigón (Zega & Di Maio, 2011).

2.3.1 Características del hormigón con árido reciclado en estado fresco

2.3.1.1. Trabajabilidad

Para igual contenido en agua total la reducción en la trabajabilidad del hormigón con árido reciclado medida por medio del con de Abrams, puede estar entre 15-20% respecto a un hormigón con árido natural (Topçu & Sengel, 2004). Una mayor reducción es observada cuando se utilizan áridos reciclados gruesos y finos a la vez. El uso de aditivos es conveniente, ya que la mayor demanda de agua debida a la angulosidad y porosidad cuando se utilizan áridos secos hace que la pérdida de trabajabilidad del hormigón se produzca más rápido y el asentamiento sea menor. Aunque si solo se utiliza la fracción gruesa es posible obtener la consistencia deseada sin mayores inconvenientes. El estado de humedad de los áridos y el diseño de agua de la mezcla condicionan la trabajabilidad de hormigones con árido reciclado.

El hormigón con árido grueso reciclado, por lo general necesita un 5% más de agua que un hormigón con áridos naturales, para obtener la misma trabajabilidad, debido a la mayor capacidad de absorción, (Buck, 1977; Hansen & Narud, 1983; Ravindrarajah & Tam, 1985; Etxeberria (b) *et ál.*, 2007), a su forma más angular y su textura superficial más rugosa (Topcu & Güncan, 1995; Butler *et ál.*, 2011). Aunque esa angulosidad y rugosidad, es más frecuente para áridos reciclados producidos en laboratorio, que para áridos reciclados producidos comercialmente (Sagoe-Crentsil *et ál.*, 2001) en una planta de gestión de residuos.

2.3.1.2. Contenido de aire

Algunos autores encontraron que el aire ocluido en el hormigón reciclado puede llegar hasta un 7% pero en general no se encuentran variaciones considerables en los resultados (Sánchez, 2004; Hansen, 1992). Se dice que el aire ocluido en el hormigón tiende a ser mayor y más variable debido a la alta porosidad del árido reciclado, relacionada con las características del mortero adherido que retiene más fácilmente el aire dentro de sus poros, aunque esta cuestión no debería influir si en la realización del ensayo se tiene en cuenta el factor de corrección del árido, tal y como prescribe la norma de UNE-EN 12350-7, 2001. Para un hormigón con 100% de árido reciclado se observa un mayor contenido de aire ocluido para dosificaciones con mayor relación a/c. Cuando el árido reciclado es utilizado presaturado, el contenido de aire es muy similar al del hormigón de control. El tipo de árido y la cantidad sustituida en la mezcla son determinantes (López-Gayarre, 2008), para sustituciones de hasta 50% no se encuentran cambios significativos (Bustillo, 2010).

2.3.2 Características del hormigón con árido reciclado en estado endurecido

2.3.2.1. Densidad

La menor densidad, del hormigón con árido reciclado se debe a la menor densidad del mortero adherido al árido reciclado (Topçu & Sengel, 2004). Valores entre 2200 y 2450 Kg/m³ fueron encontrados por (Xiao *et ál.*, 2006). Por su parte (Sánchez, 2004) presenta un rango de valores encontrados en la bibliografía, entre 2130 y 2400 Kg/m³, lo que significa una reducción entre un 4%-15% sobre la densidad del hormigón con árido natural para hormigones con 100% de árido reciclado grueso. El porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado es el factor más influyente en la densidad del hormigón reciclado (López-Gayarre, 2008). La densidad aumenta a medida que aumenta el tiempo de curado.

2.3.2.2. Resistencia a Compresión

La calidad del árido reciclado y la cantidad de agua total en la mezcla influyen directamente sobre esta propiedad, ya que su capacidad de absorción, que depende del mortero adherido, puede alterar la relación a_{ef}/c . Normalmente se encuentra reducida entre 5-20%, para una sustitución total de árido reciclado grueso, aunque se encuentran datos de hasta un 40%. En general su comportamiento mejora con el tiempo llegando a desarrollar una resistencia igual o ligeramente superior respecto a un hormigón con árido natural.

Evidentemente el uso de adiciones puzolánicas, como ceniza volante, humo de sílice, escoria, metakaolin, etc., mejora la resistencia a compresión del hormigón entre otras propiedades y se puede resaltar que esa mejora tiende a ser mayor con la edad. Lo interesante es que a largo plazo el hormigón reciclado presenta un mayor incremento en la resistencia respecto a un hormigón con árido natural con adiciones en las mismas proporciones, lo cual puede atribuirse a la naturaleza del árido reciclado ya que su mayor porosidad permite que parte de las adiciones minerales que penetran en los poros del árido reciclado reaccionan posteriormente mejorando la interfase entre la pasta y los áridos, o que las grietas que poseen los áridos reciclados debido a su procesamiento puedan ser llenadas por productos de hidratación (Kou (a) *et ál.*, 2011).

El hormigón con árido reciclado producido en laboratorio no presenta un coeficiente de variación muy diferente al de un hormigón fabricado con árido natural, cuando se utiliza el mismo árido reciclado para su producción (BCSJ, 1978; Hansen & Narud, 1983) o cuando la fuente es conocida y el árido presenta una buena calidad (absorción 3,47%) el coeficiente puede ser incluso menor que el de un hormigón con árido natural (Rahal, 2007). Sin embargo en la práctica, este coeficiente no es reproducible debido a la heterogeneidad del suministro de áridos reciclados y la dificultad para mantener una relación a_{ef}/c uniforme en hormigones con árido reciclado. La sustitución total o parcial del árido grueso por árido reciclado aumenta el coeficiente de variación de la resistencia a compresión (Etxeberria (b) *et ál.*, 2007), (Yang *et ál.*, 2008), lo cual no constituye una buena noticia desde el punto de vista del control de calidad. Sobre el coeficiente de variación algunas investigaciones indican que puede estar alrededor del 12% (de

Pauw, 1981), pero pueden presentarse mayores coeficientes de variación, llegando hasta un 25% (Hansen T.C., 1986).

2.3.2.3. Resistencia a Tracción

El hormigón reciclado tiene un comportamiento a tracción similar a un hormigón con árido natural. Hasta con un 50% de sustitución de árido reciclado, esta propiedad no se ve afectada debido a que en general más que las características del árido, influye el tipo de cemento (Sagoe-Crentsil *et ál.*, 2001). Normalmente a 28 días la diferencia para la resistencia a tracción indirecta del hormigón con áridos reciclados suele ser inferior 10%, respecto a un hormigón convencional (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002). Utilizar el total de la fracción gruesa de áridos reciclados genera una pérdida de resistencia de hasta un 30% (Sánchez, 2004). La resistencia del hormigón de origen y la cantidad de mortero adherido son determinantes, además de la relación a/c del nuevo hormigón (Barra M., 1996; Tabsh & Abdelfatah, 2009).

En la Tabla 2.13 se muestran los coeficientes presentados en la bibliografía para los hormigones reciclados respecto a la resistencia a tracción del hormigón de control para distintos porcentajes de sustitución de áridos reciclados en la mezcla (Sánchez, 2004). Se presentan también ecuaciones presentadas por Sánchez y Bustillo adaptadas partir de las ecuaciones de la EHE-08 y la ACI-318 para determinar la resistencia a tracción a partir de la resistencia de compresión del hormigón y que pueden ser utilizadas para hormigones con árido reciclado.

Tabla 2.13. Formas de estimar la resistencia a tracción de hormigones con árido reciclado.

Coeficientes de Corrección (Sánchez, 2004)	EHE -08 (Sánchez, 2004)	ACI 318 - 02 (Bustillo, 2010)
Resistencia a tracción 3,5 MPa		
20- 50% árido reciclado = 0,98	$f_{ci} = 0,33\sqrt[3]{(f_{cm} - 8)^2}$	$f_t = 0,49\sqrt[2]{f_c}$
100% árido reciclado = 0,81		

2.3.2.4. Modulo de Elasticidad

Algunos investigadores han intentado establecer ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad, relacionándolo con la resistencia a compresión del hormigón con árido reciclado. En la Tabla 2.14 se presentan algunas ecuaciones propuestas:

Tabla 2.14. Ecuaciones propuestas para el Módulo de elasticidad E en hormigones con árido reciclado.

Investigador	Ecuación propuesta para E en (MPa)
(Ravindrarah & Tam, 1985)	$E_c = 7770 \times f_c^{0,33}$
(Kakizaki <i>et ál.</i> , 1988)	$E_c = 1,9 \times 10^5 \times \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1,5} \times \sqrt{\frac{f_c}{2000}}$
(Dillmann, 1998)	$E_c = 634,43 \times f_c + 3057,6$
(Dhir <i>et ál.</i> , 1999)	$E_c = 370 \times f_c + 13100$
(Mellmann, 1999)	$E_c = 378 \times f_c + 8242$
(Zilch & Roos, 2001)	$E_c = 9100 \times (f_c + 8)^{1/3} \times \left(\frac{\rho}{2400}\right)^2$
(ACI 318, 2002)	$E_c = \rho^{1,5} \times 0,043 \sqrt{f_c}$
(Corinaldesi V. , 2010)	$E_c = 18800 \times \sqrt[3]{\frac{0,83 \times f_c}{10}}$ con 30% de AR fino $E_c = 909 \times f_c + 8738$ solo con árido grueso

Donde f_c = resistencia a compresión (MPa) en probetas cilíndricas.
 ρ = densidad del hormigón (Kg/m³).

La utilización de árido reciclado afecta principalmente al módulo de elasticidad del hormigón. En general son varios los factores que influyen, el árido reciclado está formado por pasta que además de tener un menor módulo que el árido, presenta una textura superficial rugosa y una cantidad de fisuras y micro fisuras debidas al

proceso de trituración al que ha sido sometido generando zonas de unión débiles. Además el tamaño de los áridos reciclados puede verse reducido, debido a la ruptura de las partículas de mortero adherido durante la mezcla y fabricación del hormigón (Oloukun *et ál.*, 1991), (Kheder & Al-Windawi, 2005). La relación a/c del hormigón y el porcentaje de sustitución de árido reciclado son parámetros influyentes en el módulo de elasticidad (Xiao *et ál.*, 2005). Un menor módulo de elasticidad para el hormigón con árido reciclado podría no ser del todo negativo, en su uso estructural, ya que al ser un material de menor rigidez puede ser menos susceptible al agrietamiento (Berndt, 2009).

En la bibliografía se encuentran distintos resultados sobre el rango de variación del módulo de elasticidad. Para un hormigón con 100% de árido reciclado se encuentra una reducción del módulo de elasticidad en el hormigón generalmente entre 15-30%, aunque se encuentran datos de un 3% (Rahal, 2007), pasando por un 45% (Xiao *et ál.*, 2005; Xiao *et ál.*, 2006) hasta un 80% (Topcu, 1995). Normalmente hasta un 20% de sustitución de árido reciclado el modulo no se ve afectado y a largo plazo puede llegar a ser equivalente a un hormigón con árido natural.

2.3.2.5. Fluencia y retracción

El aumento en la retracción normalmente se sitúa entre 10-20% para hormigón con 100% de árido reciclado grueso. Mientras que la fluencia aumenta normalmente entre un 25% y 50% (Pryce-Jenkins, 2011). La presencia de mortero adherido al árido reciclado contribuye a obtener hormigones con una mayor fluencia y retracción por secado (Limbachiya *et ál.*, 2000; Ravindrarajah & Tam, 1985; Domingo *et ál.*, 2009). Sin embargo, el método de dosificación y el procedimiento de fabricación pueden influir significativamente en los resultados. Cuando un hormigón con árido reciclado es diseñado con el método del mortero equivalente puede presentar valores de fluencia y retracción menores o iguales a un hormigón con áridos naturales (Fathifazl *et ál.*, 2011).

2.3.2.6. Adherencia

El uso de áridos reciclados no parece tener un efecto significativo en el comportamiento químico o mecánico de la adherencia de barras lisas o corrugadas en el hormigón (Kakizaki *et ál.*, 1988). De hecho algunos autores encuentran que la adherencia entre la armadura y el hormigón con árido reciclado, es mayor que para un hormigón con árido natural, (Xiao & Falkner, 2007), (Corinaldesi & Moriconi, 2009). Incluso el uso de áridos reciclados finos, al igual que algunas adiciones minerales, puede cambiar el comportamiento reológico del hormigón, dando lugar a una menor exudación (sangrado) (Moriconi & Corinaldesi, 2005) y mejorando la adherencia. Sin embargo, (Eguchi *et ál.*, 2007) encuentra que a medida que se sustituye una mayor cantidad de árido reciclado en el hormigón, la tensión máxima de adherencia tiende a disminuir ligeramente, lo que coincide con (Butler *et ál.*, 2011) quien establece que la adherencia no se correlaciona con la resistencia a tracción y que además está influenciada por los procesos de trituración a los que se ha sometido al árido reciclado. A mayor trituración la adherencia disminuye.

2.3.2.7. Resistencia al fuego

Debido a la mayor absorción de agua del árido reciclado, se espera un mayor contenido de agua en el hormigón reciclado y en cuanto mayor es el contenido de agua, mayor es el grado de descascarillado del hormigón frente al fuego. Sin embargo, Eguchi *et ál.*, ensayaron un hormigón con árido natural con absorción de alrededor de 4,3-4,7% y otro con árido reciclado con 100% de sustitución del árido grueso con absorción de 6,9-7,1%, y no se observó el desprendimiento de hormigón en ninguna de las muestras. Por ello la resistencia al fuego del hormigón reciclado no se considera significativamente diferente respecto a un hormigón con árido natural (Eguchi *et ál.*, 2007).

2.3.2.8. Comportamiento sísmico

Una estructura de hormigón con árido reciclado se comporta suficientemente bien como para resistir sollicitaciones sísmicas. Xiao *et ál.*, (2006) encuentra que el

comportamiento sísmico de una estructura de hormigón con áridos reciclados puede verse afectado a medida que incrementa el porcentaje de sustitución éstos, mientras (Li, 2009) sostiene que el comportamiento sísmico de marcos de hormigón reciclado es comparable con el de un hormigón con árido natural, independientemente del contenido de árido reciclado.

2.3.3 Límites al contenido de árido reciclado en el hormigón

Como se observó las propiedades del hormigón con áridos reciclados han sido ampliamente estudiadas y recopiladas por diversos autores (Nixon, 1978; Hansen, 1986; Barra M., 1996; Sánchez, 2004; Xiao *et ál.*, 2006; Pryce-Jenkins, 2011; Xiao *et ál.*, 2012). En general existen tendencias que indican que el uso de hasta un 30% de árido grueso reciclado no tiene una influencia significativa sobre las propiedades del hormigón (Etxeberria (b) *et ál.*, 2007; González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2005), (Figura 2.14), por lo que algunas normativas y recomendaciones dejan este valor como límite (NTC, 2008), o incluso establecen un límite menor, 20% (Ministerio de Fomento de España, 2008). Muchos investigadores coinciden en que un reemplazo de hasta el 50% no genera diferencias significativas en algunas propiedades (Poon *et ál.*, 2004; Chakradhara *et ál.*, 2011).

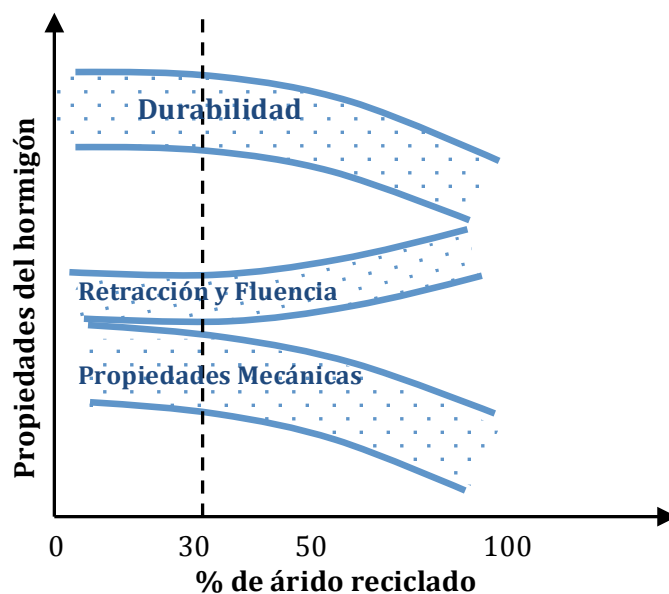


Figura 2.14. Comportamiento de las propiedades del hormigón según el contenido de árido reciclado (Limbachiya *et ál.*, 2012).

Hansen, (1992) establece que el hormigón con árido reciclado puede presentar las mismas o mejores propiedades que un hormigón con árido natural para una misma relación a/c total. Aunque el árido reciclado procedente de RCD's presente una menor calidad que un árido natural, es posible obtener un hormigón con árido reciclado grueso que cumpla requisitos de resistencia a compresión de entre 30 y 40MPa (Hansen & Narud, 1983; Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002).

2.4 Microestructura del hormigón con áridos reciclados

La calidad de la interfase entre la pasta y el árido, tiene gran influencia en el comportamiento mecánico de los hormigones (Otsuki *et ál.*, 2003). Los áridos reciclados, obtenidos mediante procesos de trituración y según su composición y origen, presentan en general una mayor porosidad, mayor absorción y una textura superficial más rugosa que los áridos naturales. La existencia del mortero adherido al árido reciclado puede afectar la interfase y por lo tanto las propiedades y características de los hormigones al presentar una matriz diferente (Figura 2.15). Sin embargo, los hormigones reciclados presentan resistencias mecánicas similares a un hormigón convencional, y un comportamiento satisfactorio frente a diferentes mecanismos de transporte que pueden afectar su durabilidad (Zega *et ál.*, 2006), aunque es posible encontrar en la literatura científica cierta controversia sobre la zona de interfase en hormigones con árido reciclado debido a su complejidad.



Figura 2.15. Diferentes tipos de árido reciclado en la matriz de un hormigón a_{ef}/c 0,45 con 100% de árido reciclado.

En el hormigón con árido reciclado, existen tres zonas de interface distintas (Poon *et ál.*, 2004) y claramente diferenciadas:

- El mortero antiguo y el mortero nuevo
- El mortero antiguo y el árido antiguo
- El mortero nuevo con el árido antiguo

Un árido reciclado sin mortero adherido, presenta en su interfase un comportamiento similar que un árido natural (Etxeberria, 2004).

Algunos investigadores, consideran la antigua zona de transición, como una zona débil (Otsuki *et ál.*, 2003; Kou *et ál.*, 2007; González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2008), debido a la presencia de poros y grietas en el árido reciclado que pueden almacenar un alto contenido de agua y afecta la antigua interfase. La interfase entre la pasta nueva y el árido reciclado, puede promover la formación de un mayor contenido de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$, CH o portlandita). Estos cristales de CH tienden a formarse en los poros del árido reciclado, en el mortero adherido antiguo, tal como reporta (Kong *et ál.*, 2010) y cuyas micrografías son presentadas en la Figura 2.16.

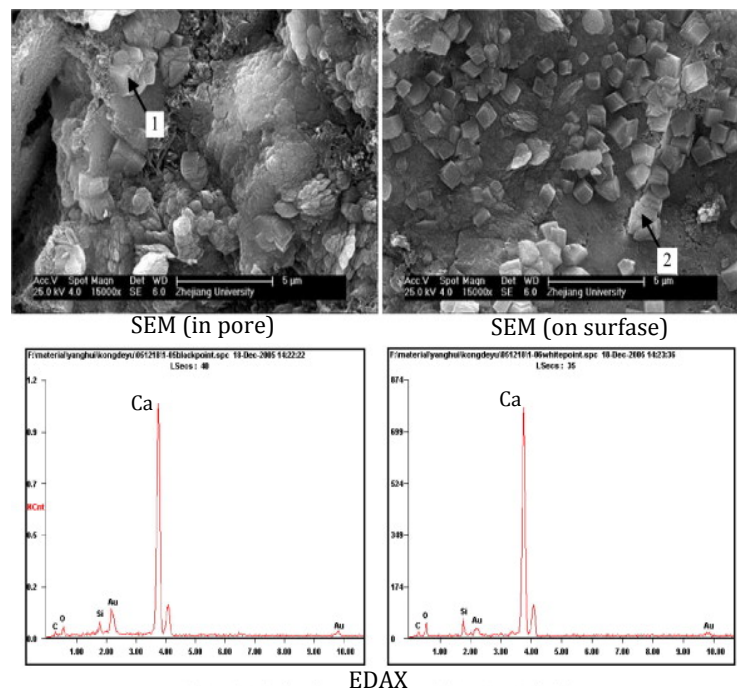


Figura 2.16. Cristales de hidróxido de calcio formados en el mortero adherido del árido reciclado (Kong *et ál.*, 2010).

La dureza de la interfase entre el mortero antiguo y el mortero nuevo puede ser también similar al hormigón fabricado con áridos naturales cuando se utiliza un procedimiento de mezclado adecuado (Otsuki *et ál.*, 2003). La literatura científica considera relevantes las condiciones de humedad que intervienen tanto en la fabricación como en el curado del hormigón. Según el proceso de fabricación la interfase puede presentar diferentes características y sobre la superficie de los áridos pueden presentarse dos situaciones:

(1) se forma una película de agua alrededor de los áridos durante el amasado, haciendo que la interfase pueda tener una relación a/c casi dos veces mayor que la relación a/c de la pasta (Scrivener & Pratt, 1996). A medida que se producen los fenómenos de hidratación la película de agua va siendo paulatinamente reemplazada por el cemento hidratado.

(2) sobre la superficie de los áridos se acumula pasta de cemento de menor relación a/c, lo cual permite que se presente una zona de transición más efectiva y fuerte (Etxeberria (b) *et ál.*, 2007), aunque en el caso de los áridos reciclados éste fenómeno no siempre se da para la interfase entre la nueva pasta de cemento y el mortero adherido al árido reciclado (Etxeberria *et ál.*, 2006).

Mejorar la microestructura de la interfase, evidentemente permite mejorar las propiedades del hormigón con árido reciclado (Otsuki *et ál.*, 2003; González-Fonteboá & Martínez-Abella, 2008), por lo que algunos autores han dirigido sus esfuerzos a establecer procedimientos llevados a cabo tanto durante el proceso de mezclado (Tam *et ál.*, 2005), como pre-tratamientos sobre el mismo árido reciclado previo a su uso (Tam *et ál.*, 2007; Katz, 2004). Incluso se llega a decir que la dureza de la antigua interfase puede incrementar, al mejorar la resistencia del mortero adherido al árido, por lo que la cantidad de mortero adherido no siempre tiene un efecto negativo en la zona de transición (Yamato *et ál.*, 2000; Corinaldesi & Moriconi, 2009).

En el caso de utilizar los áridos reciclados en condiciones naturales secos al aire (contenido de humedad moderado), se obtienen mejores valores de resistencia a compresión que cuando los áridos son utilizados en estado saturado con superficie seca, debido al mejoramiento de la antigua zona de interfase. Se prevé que existan

materiales cementicos residuales que puedan aún reaccionar y que permiten una adherencia adecuada en la interfase entre la pasta antigua y la pasta nueva, además una baja relación a/c alrededor del árido reciclado, permite la formación de hidratos que rellenen rápidamente esta zona de transición (Poon *et ál.*, 2004).

También puede presentarse la situación en que los residuos de cemento carbonatado introduzcan dióxido de carbono en la matriz de cemento nueva, provocando reacciones similares a las que ocurren entre áridos calizos y pastas de cemento (Monteiro & Mehta, 1986).

A largo plazo el hormigón con árido reciclado presenta un mejoramiento de sus propiedades en mayor magnitud que un hormigón convencional, sobre todo para su resistencia a tracción, lo cual puede ser debido a la mejor adherencia entre la pasta nueva y el árido reciclado, ya que el proceso de hidratación continúa a media que aumenta el tiempo mejorándose la calidad en la microestructura de la interfase (Poon *et ál.*, 2006; Kou *et ál.*, 2011).

En las micrográficas de la Figura 2.17 se muestra la interfase de un hormigón con áridos reciclados que fueron previamente acondicionados a través de tratamientos químicos (Tam *et ál.*, 2007), los cuales se basan en un prelavado de los áridos reciclados ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido fosfórico (H₃PO₄).

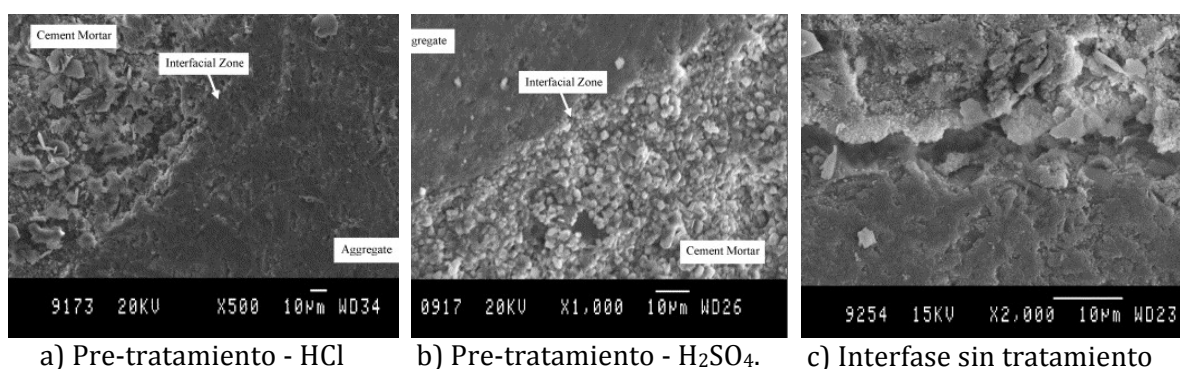


Figura 2.17. Interfase de hormigones con árido reciclado sometido a un pretratamiento. a) con HCl, b) con H₂SO₄ y c) Interfase de un hormigón reciclado sin tratamiento (Tam *et ál.*, 2007).

La exposición de los áridos al ácido permite diluir parcialmente el mortero adherido a la superficie, mejorando así la calidad del árido y por lo tanto las propiedades del hormigón reciclado.

La naturaleza porosa de los áridos reciclados, permite que durante el proceso de pre-mezcla algunos poros y grietas se puedan llenar, dando lugar a un hormigón con una zona de interfase más densa alrededor del árido reciclado. Métodos de doble mezcla (Ryu, 2002), (Otsuki *et ál.* 2003), o de mezclado en dos etapas (Tam *et ál.*, 2005) permiten obtener una interfase más densa y compacta, contribuyendo así a obtener un hormigón con mejores resistencias mecánicas y una menor permeabilidad.

2.5 Propiedades de durabilidad de hormigón con áridos reciclados

Partiendo de la idea de que el hormigón se proyecta con el fin de que permanezca estable a lo largo del tiempo sin perder las propiedades físicas y químicas que lo caracterizan se hace necesaria la evaluación y análisis de la durabilidad del hormigón con árido reciclado. Los procesos que pueden provocar una durabilidad insuficiente son variados y complejos ya que dependen de cada una de las etapas del elemento, desde su concepción y diseño en proyecto, pasando por la calidad de los materiales que lo componen, la ejecución y finalmente el mantenimiento; además de factores ambientales como el clima y las condiciones a las que se encuentre sometido. A lo largo del tiempo, los investigadores siguen manteniendo que una construcción y curado adecuados son los factores clave para asegurar la durabilidad del elemento estructural y reducir el riesgo de corrosión de armaduras (Shi *et ál.*, 2012).

La durabilidad del hormigón se refiere a su capacidad para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro (ACI Committee 201, 2008).

Sobre el hormigón con árido reciclado diversas opiniones son emitidas por los investigadores al evaluar las propiedades de durabilidad. En la Tabla 2.15, se presentan las tendencias que exponen algunos investigadores.

En general sobre las propiedades de durabilidad del hormigón con árido reciclado se han realizado interesantes investigaciones y una gran parte coincide en que la durabilidad del hormigón se ve reducida con el aumento en la cantidad de árido reciclado en la mezcla, haciendo más vulnerable el hormigón a la penetración, difusión y absorción de elementos. Aunque por otro lado, otros autores establecen que la durabilidad puede mejorar con la edad de curado (Olorunsogo & Padayachee, 2002; Kou (a) *et ál.*, 2011).

Tabla 2.15. Tendencia de las propiedades de durabilidad del hormigón con árido reciclado, respecto a un hormigón con árido natural.

Propiedad	Tendencia del HAR respecto al HAN	Referencias
Permeabilidad al agua	Aumenta	(Limbachiya <i>et ál.</i> , 2000), (Buyle-Bodin & Hadjieva-Zaharieva, 2002), (Yang <i>et ál.</i> , 2008)
	Sin tendencia clara	(López-Gayarre <i>et ál.</i> , 2011), (Zega & Di Maio, 2011)
Resistencia frente a la acción de Hielo / Deshielo	Disminuye	(Nishibayashi & Yamura, 1988), (Topçu & Sengel, 2004), (Debieb <i>et ál.</i> , 2010), (Gokce <i>et ál.</i> , 2011)
	Similar o Aumenta	(Dhir <i>et ál.</i> , 1999), (Limbachiya <i>et ál.</i> , 2000), (Zaharieva <i>et ál.</i> , 2004), (Debieb <i>et ál.</i> , 2010), (Richardson <i>et ál.</i> , 2011).
Resistencia a la carbonatación	Disminuye	(Sagoe-Crentsil <i>et ál.</i> , 2001), (Evangelista & de Brito, 2010)
	Similar o Aumenta	(Dhir <i>et ál.</i> , 1999) (Limbachiya <i>et ál.</i> , 2000), (Otsuki <i>et ál.</i> , 2003), (Levy & Helene, 2004), (Limbachiya <i>et ál.</i> , 2004), (Eguchi <i>et ál.</i> , 2007).
Resistencia a la penetración de Cloruros	Disminuye	(Otsuki <i>et ál.</i> , 2003), (Poon <i>et ál.</i> , 2006), (Kou <i>et ál.</i> , 2007), (Ann <i>et ál.</i> , 2008), (Sim & Park, 2011), (Chakradhara <i>et ál.</i> , 2011)
	Similar o Aumenta	(Limbachiya <i>et ál.</i> , 2000), (Berndt, 2009), (Kong <i>et ál.</i> , 2010), (Tu <i>et ál.</i> , 2006),

Las características de durabilidad pueden estar más condicionadas a la relación a/c , por lo que no se establece como significativa la influencia de áridos reciclados en propiedades como la permeabilidad del hormigón (Somna *et ál.*, 2011; López-Gayarre *et ál.*, 2011; Zega & Di Maio, 2011). De hecho se hace referencia al mejoramiento de la interfase y por lo tanto a la reducción de la permeabilidad del hormigón reciclado, lo cual algunos no encuentran del todo lógico al tener en cuenta que la porosidad del árido repercute en esta propiedad, por lo que en ocasiones se cuestiona la precisión del ensayo empleado.

Se encuentra en la bibliografía numerosos estudios respecto a la acción de los ciclos de hielo-deshielo en hormigones reciclados encontrando, como se presentó en la tabla, tendencias que llegan a ser contradictorios. La mayor porosidad en el hormigón reciclado implica, en caso de saturación, un mayor volumen de agua absorbida si se compara con un hormigón convencional, lo que representa un mayor deterioro de los hormigones reciclados frente a heladas. En general, se observa una reducción máxima del 10% de la resistencia al hielo-deshielo para los hormigones reciclados. El estado en el que son introducidos los áridos al hormigón, también influye sobre esta propiedad, cuando se utilizan los áridos totalmente saturados, el comportamiento de los hormigones frente a hielo-deshielo es peor que cuando éstos se utilizan en estado semisaturado (Barra & Vázquez, 1996).

Algunos investigadores establecen que el hormigón se ve afectado negativamente por el uso de áridos reciclados frente a la carbonatación, ya que la velocidad de carbonatación puede aumentar entre un 10% (Sagoe-Crentsil *et ál.*, 2001) y un 65% (Hansen, 1992) para hormigones con 100% de árido reciclado. Sin embargo, por otro lado se ha encontrado que el uso de 100% de árido reciclado grueso no afecta al hormigón frente a la carbonatación (Abbas *et ál.*, 2009), y en el caso en el que los hormigones presentan la misma resistencia, puede llegar a producirse una mejora en la protección a medida que aumenta la cantidad de árido reciclado en la mezcla, debido a la reserva alcalina que puede quedar almacenada en la pasta antigua de mortero y además que para obtener la misma resistencia de un hormigón con áridos naturales, la relación a_{ef}/c del hormigón reciclado debe ser menor (Levy & Helene, 2004). El efecto positivo de la reserva alcalina se presenta al impedir la destrucción de la película pasivante protectora del acero de refuerzo, por lo que puede aumentar la vida útil de estructuras de hormigón (Tuutti, 1982).

En general, el uso de áridos reciclados no influye sobre hormigones con baja relación a/c (0,40), ya que sus propiedades se ven más influenciadas por la matriz y el sistema de poros, con una baja permeabilidad que por las características del árido reciclado y por lo tanto la carbonatación no es un riesgo para la corrosión de las armaduras (Corinaldesi & Moriconi, 2009).

Se observa que la resistencia a la penetración de cloruros en el hormigón medida según la norma ASTM-C1202, 2005, disminuye a medida que se incorporan áridos reciclados en la mezcla. A pesar del aumento en la penetración de cloruros, se alcanza una clasificación de riesgo “medio”, para hormigones con más de 50% de árido reciclado (Xiao *et ál.*, 2004). Para un hormigón con 100% de árido reciclado grueso se observa una disminución de la resistencia a la penetración de cloruros desde un 16% (Kou *et ál.*, 2011) hasta un 60% respecto al hormigón de control según la relación a/c ya que con bajas relaciones a/c puede comportarse igual a un hormigón con áridos naturales (Ann *et ál.*, 2008), encontrando que evidentemente el uso de materiales puzolánicos, contribuye a mejorar la resistencia a la penetración de cloruros (Kou & Poon, 2010; Kou *et ál.*, 2011).. Existen distintos métodos y procedimientos de ensayo para evaluar esta propiedad por lo que se encuentran resultados contradictorios y unidades de medida diferentes. Así, algunos autores han encontrado que la penetración de cloruros en hormigones con árido reciclado es menor respecto a un hormigón con áridos naturales a pesar de que el árido reciclado tiene una mayor porosidad (Corinaldesi & Moriconi, 2009).

Los mecanismos frente a la difusión de cloruros en los hormigones con árido reciclado son más complejos, debido a la diferencia en su microestructura (Poon *et ál.*, 2004), por lo tanto son de gran interés en el desarrollo de este trabajo. Los resultados encontrados también son contradictorios, sin embargo, parece evidente que la relación a/c tiene gran influencia sobre la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros, por lo que cuando se utilizan bajas relaciones a/c el riesgo a la penetración de cloruros disminuye, ya que como se ha comentado, la permeabilidad del hormigón depende más de la calidad de la matriz de cemento que de la porosidad de los áridos (Zhang & Gjrv, 1991).

La protección que da el hormigón con árido reciclado frente a la corrosión de armaduras puede ser inferior respecto a un hormigón con árido natural, pero depende del porcentaje de sustitución, la calidad del árido reciclado y la relación

agua/cemento del hormigón reciclado, así como evidentemente el espesor del recubrimiento de la armadura.

La calidad del árido es decisiva en el comportamiento del hormigón frente a la durabilidad, cuando los áridos reciclados están contaminados por cloruros o sulfatos, la probabilidad de corrosión se sitúa en el 90% para un hormigón fabricado con éstos (Debieb *et ál.*, 2010). El uso de un 100% de árido reciclado puede reducir ligeramente la resistividad eléctrica del hormigón respecto a un hormigón con árido natural, lo cual significa un incrementando en la velocidad de corrosión (Figura 2.18). Relaciones a/c adecuadas permiten obtener hormigones con árido grueso reciclado para uso estructural, con características similares respecto a un hormigón con árido natural (Arredondo-Rea, *et ál.*, 2011). Los hormigones con árido grueso y fino reciclado, indican una mayor susceptibilidad a la corrosión (Corral-Higuera *et ál.*, 2011).

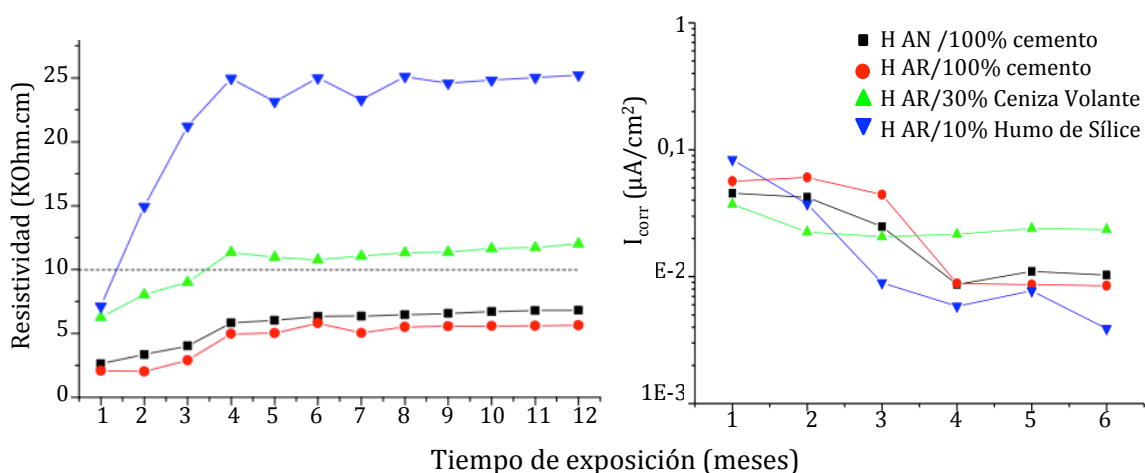


Figura 2.18. Evolución de la resistividad y la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición (Arredondo-Rea, *et ál.*, 2011).

La presencia del ambiente de cloruros hace que el potencial de corrosión sea más negativo a medida que aumenta el tiempo de exposición. En general no existe una diferencia significativa entre un hormigón convencional y un hormigón con árido reciclado respecto al potencial de corrosión. Sin embargo, la Corriente de corrosión I_{corr} para el acero embebido en el hormigón con 100% de árido reciclado fue

ligeramente superior y el tiempo de iniciación de la corrosión más corto (Limbachiya *et ál.*, 2000).

El uso de materiales puzolánicos también mejora las condiciones del hormigón reciclado disminuyendo la probabilidad de corrosión (Ann *et ál.*, 2008; Arredondo-Rea, *et ál.*, 2011; Kong *et ál.*, 2010), que contribuye a la formación de sal de Friedel, limitando la cantidad de cloruros libres que pueden llegar hasta la armadura y provocar una corrosión localizada. La matriz de cemento es un parámetro decisivo en la calidad del hormigón reciclado (Poon *et ál.*, 2006).

2.6 La corrosión de armaduras en el hormigón expuesto a un ambiente marino

Diversos autores han definido procesos y mecanismos de deterioro (Figura 2.19), coincidiendo en que la corrosión del acero de refuerzo es la principal causa de los daños y la falla prematura de estructuras de hormigón armado, especialmente si están expuestos a un agente agresivo de cloruros (ACI Committee 222, 2001), como el medio ambiente marino (Venkatesan, 2006), (Güneyisi *et ál.*, 2007).

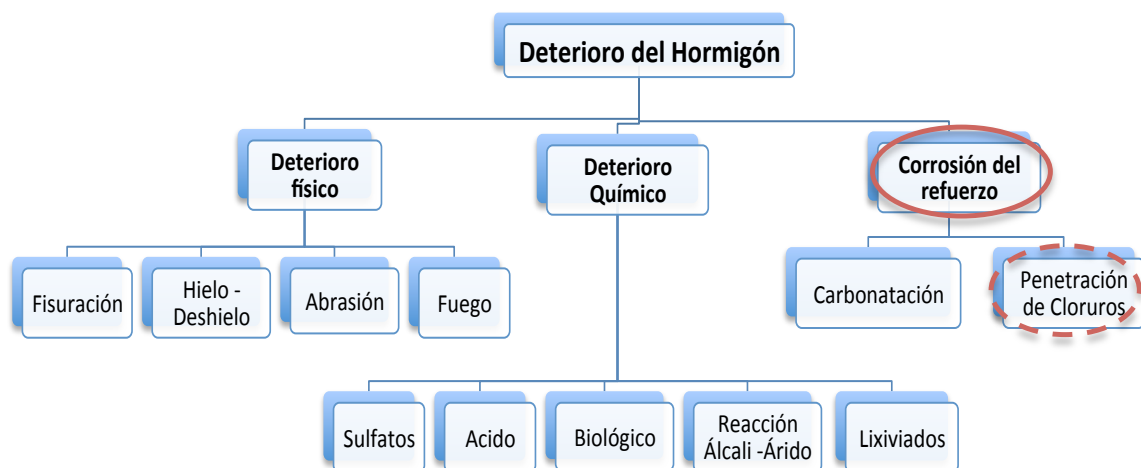


Figura 2.19. Mecanismos de deterioro en el Hormigón (Isgor, 2001).

La corrosión se define como la destrucción o el deterioro de un metal debido a su reacción con el medio en el que se encuentra (Uhlig, 1970), e implica no solo una reducción en la sección de acero, sino también un incremento de volumen por la aparición del óxido que genera tensiones en el recubrimiento del hormigón y su consecuente fisuración (Guzmán, 2010).

Los mecanismos de ingreso de cloruros y la difusión de CO₂ (carbonatación) desde el ambiente, junto con los mecanismos de transporte de agua en el interior del hormigón se presentan como protagonistas de su deterioro. La carbonatación se produce como un fenómeno químico donde el CO₂ que penetra en el hormigón reacciona con el hidróxido cálcico y reduce la alcalinidad del hormigón, llegando a destruir esa capa pasiva que lo protege, dando pie a la corrosión de armaduras. La carbonatación depende de la composición del cemento, el tipo de árido y la porosidad (Levy & Helene, 2004). Por su parte, el hormigón expuesto a un ambiente de cloruros, puede deteriorarse debido a los efectos combinados de la acción química de los constituyentes del agua de mar sobre el hormigón, provocando un aumento de la permeabilidad, considerada como el factor clave de la durabilidad (Mehta & Monteiro, 1986). El interés en este trabajo, se centra en el estudio de la corrosión producida por el ingreso de cloruros, por lo que se estudiara más a fondo.

Distintas propuestas se han establecido para proteger las estructuras de hormigón de la corrosión inducida por cloruros. Las recomendaciones apuntan a hormigones de baja permeabilidad, recubrimientos de mayor espesor, diferentes capas protectoras y sellantes a base de polímeros, protección catódica y diversos refuerzos alternativos, como el uso de fibras de acero. Todo para conservar las propiedades de durabilidad de la estructura y garantizar su buen funcionamiento a lo largo de su vida útil.

La estimación de la vida útil de las estructuras de hormigón sometidas a procesos de corrosión de la armadura pasiva comprende normalmente dos fases (Tuutti, 1982). La primera se refiere al tiempo de difusión en el hormigón hasta alcanzar un determinado umbral en la concentración de iones alrededor de la armadura y la segunda corresponde al daño estructural propiamente dicho tras la aparición del óxido (Figura 2.20). El período de iniciación depende de la velocidad de penetración de los cloruros en el hormigón, función de su calidad. El período de

propagación depende de la disponibilidad de oxígeno en el interior del hormigón, controlado por el tipo de ambiente en el que se encuentra, así como por la propia calidad del hormigón, en términos de permeabilidad al oxígeno y resistividad (Ferreira, 2004).

En la interfase acero/hormigón se forma una capa pasivante protectora, en torno a 10nm, debida a un proceso de naturaleza esencialmente electroquímica, basada en la elevada alcalinidad del hormigón (pH entre 12,6 y 13,5) y un potencial electroquímico apropiado, que protegen al acero de las agresiones del exterior. Sin embargo, si el hormigón es muy poroso y/o el recubrimiento es insuficiente, se produce la penetración de agentes agresivos hasta la armadura, destruyendo la capa de pasivación, dando pie a la corrosión. La pérdida de la alcalinidad, debido a la carbonatación del hormigón y la penetración de cloruros en el acero puede destruir la capa pasiva (ACI Committee 222, 2001; Page, 1990) y es en este momento cuando empiezan los problemas en la estructura.

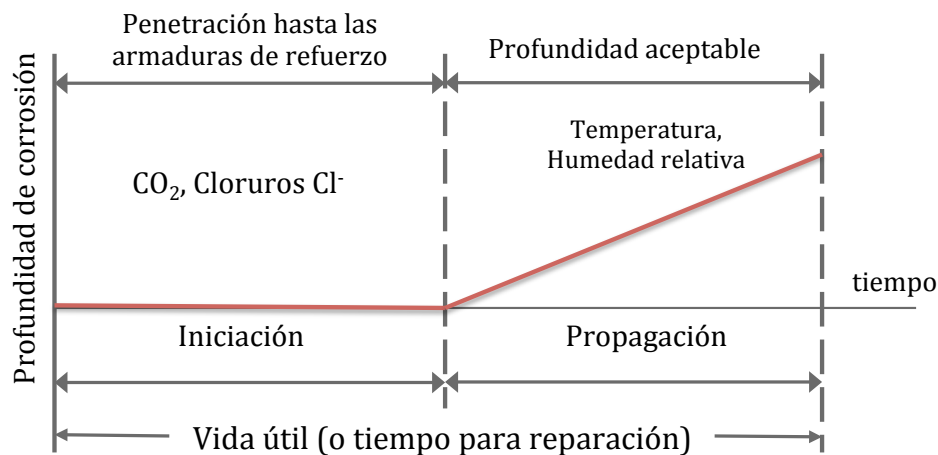


Figura 2.20. Fases de iniciación y propagación de la corrosión (Tuutti, 1982).

La estimación de la vida útil está condicionada por las propiedades del material, geometría, curado y ejecución, además de una distribución estocástica de las cargas exteriores y acciones medioambientales. Factores como el espesor del recubrimiento, la concentración superficial de cloruros, el coeficiente de difusión de cloruros o el umbral de concentración para el inicio de la oxidación del acero, son tenidos en cuenta. La valoración de la vida útil se realiza habitualmente con la

primera fase del diagrama (Tuutti, 1982), donde se define como punto final el momento en que la capa pasivante del acero de refuerzo (de pH alto) desaparece, lo cual también es considerado como una afirmación excesiva (Andrade *et ál.*, 1994), ya que el inicio de la corrosión se produce cuando una cierta cantidad de cloruros alcanza la superficie de la armadura y se altera la estabilidad y cinética de la capa pasiva (Alonso & Sánchez, 2009). Sin embargo a pesar de los muchos esfuerzos para la estimación de la concentración crítica de cloruros, es difícil establecer valores generalizados ya que intervienen numerosas variables además del método de ensayo empleado.

En las estructuras de hormigón armado expuestas al ambiente marino, la duración tanto del periodo de iniciación como del de propagación, y consecuentemente el riesgo de corrosión, están condicionados por el tipo de ambiente marino en el que se encuentra la estructura, ya que distintos mecanismos de transporte actúan en el hormigón para cada situación (Alaejos & Bermúdez, 2008), como se observa en la Figura 2.21.

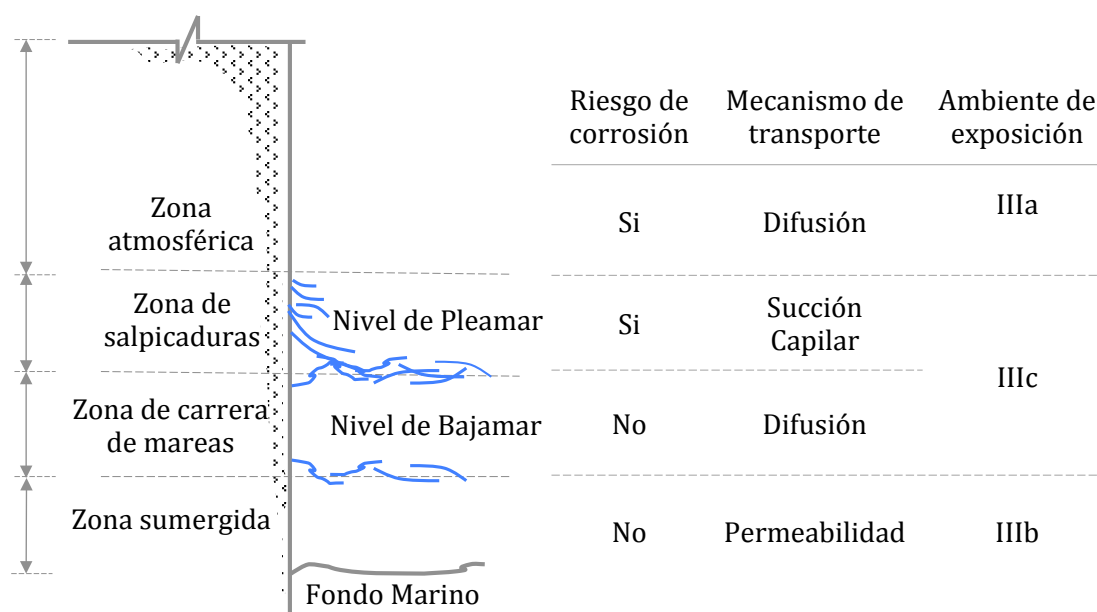


Figura 2.21. Ambientes de exposición para un ambiente marino, riesgo de corrosión y mecanismos de transporte que intervienen.

Sin embargo, incluso en las zonas de mayor riesgo (salpicaduras y aérea) puede no aparecer corrosión, si el hormigón del recubrimiento es de elevada calidad, no

permite el acceso de oxígeno y humedad para generar las zonas catódicas o hace que la velocidad de difusión sea muy lenta.

Para estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos, se ha considerado siempre la permeabilidad del hormigón como una propiedad crítica intrínseca de éste, sin embargo, durante los últimos años los investigadores han dado mayor importancia a relación entre la difusión de cloruros en el hormigón, su microestructura de poros y la composición química de sus productos de hidratación, por lo que actualmente se desarrollan modelos de difusión en función del volumen de poros capilares, el área superficial de los materiales cementicios endurecidos o la relación Ca/Si de la cantidad de gel C-S-H formado (Shi *et ál.*, 2012).

La penetración de cloruros en el hormigón es un fenómeno complejo que involucra múltiples mecanismos, por lo que se han desarrollado diversos ensayos buscando establecer la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros, a través del coeficiente de difusión del hormigón “D”, como se detallara en el apartado 2.7.

2.6.1 Concentración de cloruros en el hormigón necesaria para que exista corrosión

Para que inicie la corrosión de las armaduras pasivas en el hormigón es necesario que exista una cantidad suficiente de iones cloruro. Se definen el contenido crítico de cloruros en el hormigón como la cantidad de éstos que provoca la corrosión activa del acero. Hasta ahora no se ha encontrado un valor único de este contenido crítico, debido a que varía en función de las características del hormigón (pH de la solución de los poros, contenido de humedad, temperatura, tipo de catión que acompaña al cloruro, contenido de C₃A y finura del cemento, adiciones, etc.) y del acero (composición, impurezas, desigualdades de la superficie, envejecimiento) (Castellote *et ál.*, 2002). Además de las condiciones de exposición como el pH, la temperatura, o la humedad (Figura 2.22).

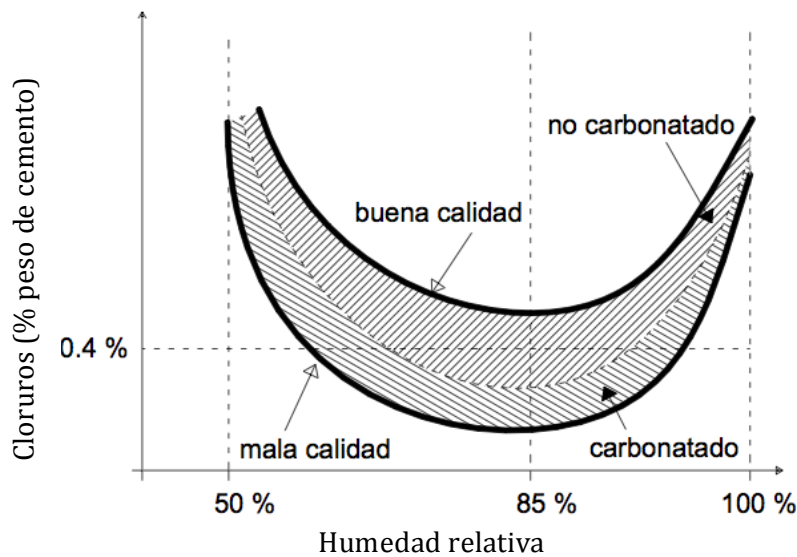


Figura 2.22. Contenido crítico de cloruros en función de la humedad ambiente (GEHO, 1996).

Los cloruros pueden estar en el hormigón combinados o libres (RILEM, 1988):

- **Combinados:** unidos química o físicamente a los minerales del cemento o a los productos de hidratación (sal de Friedel). El contenido en aluminato tricálcico (C_3A) influye directamente en la capacidad de fijación de cloruros, así, un bajo contenido de C_3A significa una menor capacidad para fijar cloruros.
- **Libres:** en la solución en los poros del hormigón.

Aunque Mejía & Rodríguez (1999) definen que los iones cloruro pueden estar presentes en el hormigón de tres maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros (Figura 2.23).

Los cloruros que afectan negativamente la armadura se hallan disueltos o libres, sin embargo, es posible que los que están adsorbidos se incorporen a la disolución convirtiéndose en peligrosos, por lo que las normativas se refieren al límite de cloruros totales.

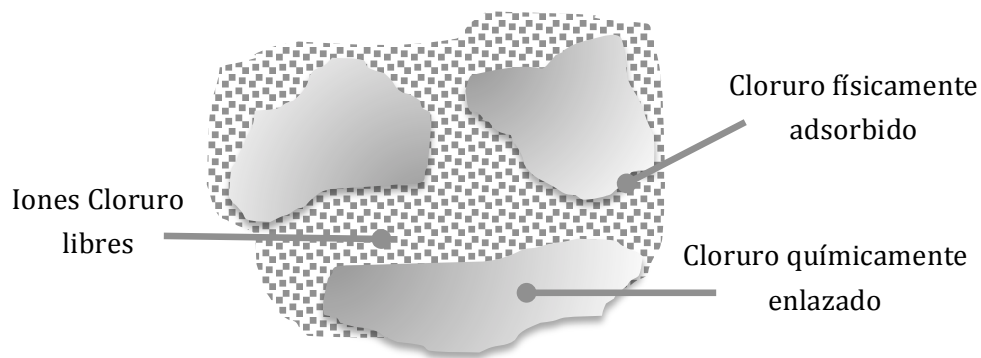


Figura 2.23. Ion cloruro en el hormigón.

Entre un 40-50% de los cloruros totales en el hormigón están combinados (Song & Shayan, 1998), aunque esta proporción varía en función del tipo de cemento empleado. Los cloruros libres pueden estar entre un 67% para cemento de aluminato tricálcico y 90% cuando un cemento con escoria de tipo B, ha sido utilizado (Bermúdez, 2007).

Para cuantificar el contenido en cloruros se suele considerar el contenido total de cloruros, como los solubles en ácido nítrico (RILEM, 1988) e iones libres, como solubles en agua (Guzmán, 2010). El resultado obtenido varía en función del procedimiento del ensayo, el tamaño de la partícula, el periodo de extracción, la temperatura, la edad y evidentemente el ambiente de exposición (ACI Committee 222, 2001). Existen distintas normas para valorar el contenido en cloruros de un hormigón (Tabla 2.16) y los resultados obtenidos en ellas pueden ser muy similares para el caso de los cloruros totales (Lanza et ál., 2005).

Tabla 2.16. Ensayos de cloruros según el método de análisis

Tipo de Cloruros	Método de ensayo	Normativa
Cloruros libres	Potenciométrico	ASTM C1218, 2008 RILEM TC 178-TMC AASHTO T260
	Volhard	UNE -EN 14629, 2007 UNE 112010, 2011
Cloruros totales	Potenciométrico	UNE -EN 14629, 2007 ASTM C1152, 2004 AASHTO T260

Para caracterizar el riesgo de corrosión según el contenido de cloruros, algunos autores proponen clasificaciones basados en datos experimentales, donde variables como el tipo de exposición y la relación a/c juegan un papel importante, ya que para menores valores de relación a/c un mayor contenido crítico de cloruros es requerido para que se inicie la corrosión. Así, la categorización propuesta por (Bamforth, 1996) es presentada en la Tabla 2.17 y la simplificación propuesta por (Izquierdo, 2003) que establece el contenido crítico de cloruros según la exposición y la relación a/c se observa en la Tabla 2.18.

Tabla 2.17. Riesgo de corrosión según el contenido de cloruros (Bamforth, 1996).

Contenido de Cloruros (% cemento)	Riesgo de corrosión
< 0,4	Despreciable
0,4 - 1,0	Posible
1,0 - 2,0	Probable
> 2,0	Significativa

Tabla 2.18. Contenido crítico de cloruros según el ambiente de exposición y la relación a/c (Izquierdo, 2003).

Exposición	Relación a/c	Valor medio de Cloruros (% Cemento)
Saturado (sumergido)	0,5	1,5
	0,4	2,0
	0,3	2,2
Otros	0,5	0,5
	0,4	0,6
	0,3	0,7

En la bibliografía se encuentra un amplio rango de variación para el contenido crítico de cloruros y normalmente está referido al % de cloruros totales o al % de cloruros libres expresados en peso de cemento o de hormigón. Los valores de cloruros libres son más fiables para establecer un valor límite de la corrosión (Oh *et ál.*, 2003), aunque algunos investigadores prefieren referenciarlo a la relación $[Cl^-]/[OH^-]$ porque incluye además de la concentración crítica, la capacidad del

hormigón para mantener pasiva la armadura e inhibir el inicio de la corrosión (Alonso & Sánchez, 2009).

El contenido crítico de cloruros puede variar entre 0,26 y 0,40, expresados como relación Cl^-/OH^- (donde Cl^- son los cloruros libres) y entre 0,17 y 2,2% expresado como %Cl totales en peso de cemento (Sandberg, 1998). Algunos indican que el contenido crítico de cloruros totales para iniciar la corrosión varía entre 0,45 y 0,97% en peso de cemento en función del contenido de C_3A .

En general es muy complejo establecer un valor para el contenido crítico, debido a que también varía según la metodología de ensayo empleada, en la Figura 2.24 se presenta el conjunto de datos de cloruros totales y cloruros libres encontrados en la literatura, donde es posible observar variaciones de % cloruros totales 0,3 a 4 y para % cloruros libres de 0,1 a 2,5 (Alonso & Sánchez, 2009).

Los ensayos naturales presentan una mayor dispersión, asociada a las variaciones alrededor de la armadura, como las características del hormigón y la mayor incertidumbre en la homogeneidad de la capa pasiva. Los ensayos acelerados (Potenciostático o de migración) arrojan datos con una menor dispersión, dando valores de concentración crítica de cloruro inferiores a los encontrados en ensayos naturales (Alonso & Sánchez, 2009).

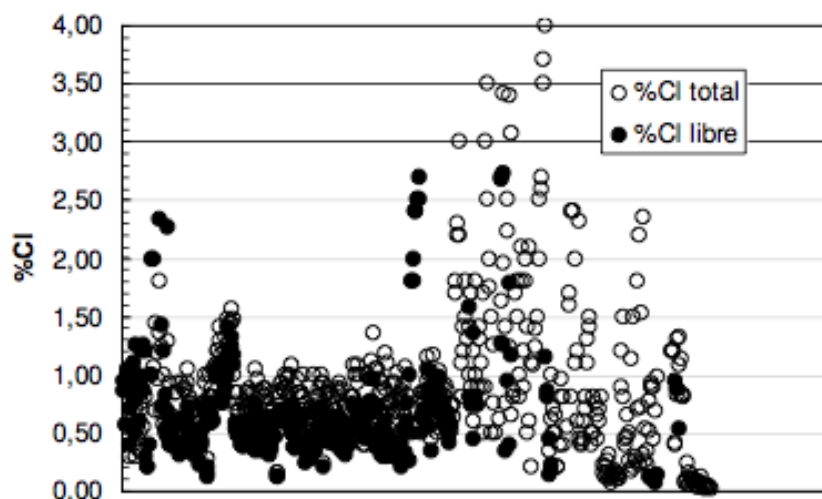


Figura 2.24. Datos de variación de la concentración crítica de cloruros expresados el % de cloruros totales y cloruros libres (Alonso & Sánchez, 2009).

Distintas normativas y recomendaciones establecen unos límites para el contenido de cloruros en el hormigón (Tabla 2.19). La instrucción EHE establece en su artículo 37.4.1 que el contenido de cloruros en el hormigón debe ser inferior al 0,4% del peso del cemento como se señala en la tabla. Sin embargo teniendo en cuenta que el inicio de la corrosión tiene lugar cuando cierta cantidad de cloruros alcanza la superficie de la armadura y se altera la estabilidad y cinética de la capa pasiva, la EHE establece en su anejo 9 como contenido crítico de cloruros para la estimación de la vida útil de las estructuras un valor de 0,6% en cloruros totales.

Tabla 2.19. Valores límite para el contenido de cloruros en el hormigón según distintas normativas (González & Miranda, 2007).

País	Norma	Límite	Referido al % en peso de
USA	ACI 318	≤ 0,15% ambiente de Cl ≤ 0,30% ambiente normal	Cemento
Reino Unido	BS 8110	≤ 0,40%	Cemento
Australia	AS 3600	≤ 0,22%	Cemento
Noruega	NS 3474	≤ 0,60%	Cemento
España	EHE 08	≤ 0,40%	Cemento
Europa	Eurocódigo 2	≤ 0,22%	Cemento
Japón	JSCE-SP 2	≤ 0,6 Kg/m ³ %	Hormigón

2.6.2 Penetración de agentes agresivos en el hormigón. Mecanismos de transporte.

Al hablar de durabilidad es imposible dejar de lado el estudio de los mecanismos de transporte de agentes agresivos en el hormigón, ya que aunque los diferentes códigos no escatiman esfuerzos para establecer criterios como el tipo y la cantidad mínima de cemento, la relación a/c, la resistencia mecánica, el espesor del recubrimiento, el grado de compactación y el curado, entre otros, estos parámetros no son suficientes para asegurar una durabilidad adecuada.

El análisis y evaluación de otras propiedades como permeabilidad, capilaridad y difusión en el hormigón, aportan información importante y valiosa tanto a nivel de diseño de nuevas estructuras, como para el conocimiento de la calidad del hormigón en servicio.

Ho, (2003) define la permeabilidad del hormigón como la facilidad con que los fluidos, en forma de líquido o gas, entran en, o se mueven a través del hormigón. El análisis de la permeabilidad, succión capilar y difusión para el control de la durabilidad del hormigón, permite entender los procesos que se producen y por ende las causas de deterioro en este tipo de estructuras (Figura 2.25).

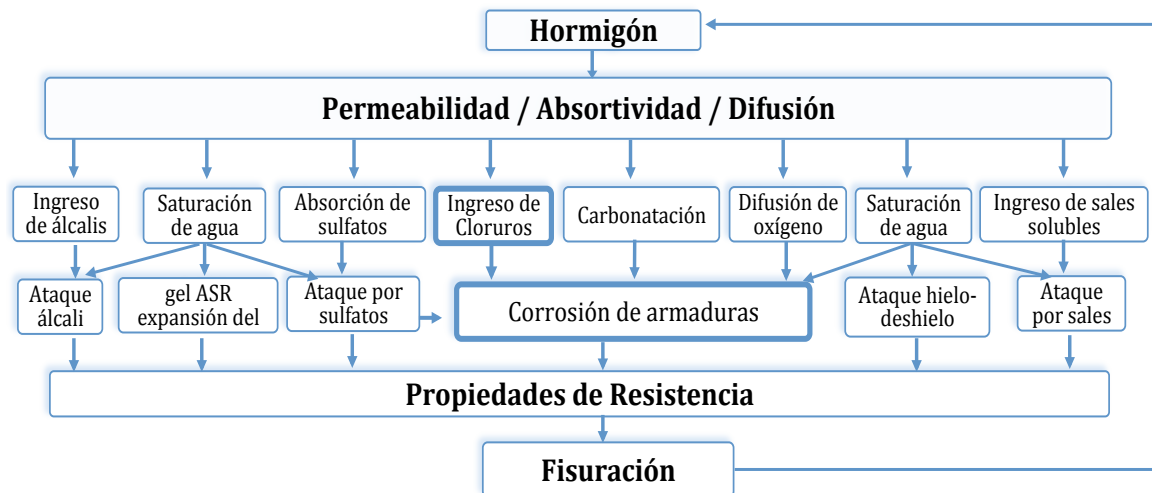


Figura 2.25. Causas de deterioro de las estructuras de hormigón armado (Basheer, 1991; Long, 2001).

Agentes que intervienen en el proceso de corrosión tales como agua, oxígeno, cloruros o sulfatos, entre otros, pueden extenderse y deteriorar el hormigón. Estos pueden reaccionar con otros agentes ya inmersos en el hormigón, llegando a generar fenómenos como la corrosión del acero de refuerzo, lo que a su vez causará grietas en el elemento de hormigón, poniendo en peligro su estabilidad.

Los principales mecanismos de transporte que pueden describir el movimiento de agentes agresivos en el hormigón se pueden clasificar en tres tipos (Long *et ál.*, 2001; Ho, 2003):

1. **Permeabilidad**, que permite el paso de un fluido a través de un material saturado bajo la acción de una presión diferencial, y en función del tamaño de los poros interconectados ($>120 \mu\text{m}$). La velocidad del flujo sigue la ley de Darcy para flujo laminar a través de un medio poroso.

$$v = -\frac{k dp}{\mu dx}$$

Donde v es la velocidad aparente de flujo (m/s), k representa la permeabilidad intrínseca del material (m^2), μ es la viscosidad del fluido ($N.s/m^2$), p la presión (N/m^2). El signo menos indica simplemente que el flujo es contrario al incremento positivo de la presión.

2. **Succión capilar**, que propiedad que caracteriza la tendencia de un material poroso para absorber y transmitir agua por capilaridad. Hace referencia al movimiento de los líquidos en los poros de la matriz del hormigón bajo succión capilar en condiciones ambientales. La succión capilar se produce en el hormigón seco o parcialmente seco, donde el líquido ocupa los espacios porosos disponibles. Este tipo de penetración es particularmente relevante para las estructuras costeras, donde las sales pueden depositarse sobre la superficie del hormigón y posteriormente ser disueltas con la lluvia formando los iones de cloruro que luego son absorbidos por el hormigón (Mejía & Rodríguez, 1999). Se dice que la evaluación de la capilaridad permite dar una idea sobre la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros y a la carbonatación (de Schutter & Audenaert, 2004). Matemáticamente la ecuación que gobierna el comportamiento de absorción capilar de agua en función del tiempo t viene dada por:

$$A = C + S\sqrt{t}$$

Donde A es el termino asociado a la entrada de agua (m^3/m^2 o g/m^2), C representa una distorsión inicial y S se refiere al comportamiento del hormigón respecto a succión capilar (absortividad) y varia entre 1 y 10 $g/(m^2.s^{1/2})$.

3. **Difusión**, que hace referencia al movimiento iónico bajo la acción de un gradiente de concentración. La difusión de agentes agresivos en el hormigón, puede ser descrita por la ley de Fick:

$$J_c = -D_a \frac{dC}{dx}$$

Donde J es el flujo ($kg/(m^2.s)$), C la concentración (kg/m^3) y D_a el coeficiente aparente de difusión (m^2/s), que se utiliza a menudo para

referirse a la velocidad a la que los gases (dióxido de carbono u oxígeno) o iones en solución (cloruros) entran en el hormigón bajo una diferencia en la concentración, según el agente de penetración y las propiedades químicas del hormigón. En este factor también influye el tamaño de los poros capilares y la velocidad de difusión.

El valor del coeficiente aparente de difusión D_a , puede suponerse constante en primera aproximación (ASTM-C1556, 2011), aunque en realidad es función de múltiples factores. Para el caso concreto de la difusión de cloruros dentro del hormigón, cabe destacar factores como la relación a/c y el tipo de cemento, además del curado, la puesta en obra, el ambiente (humedad y temperatura) y el tiempo.

Debido a su constitución, el hormigón contiene poros, algunos de ellos interconectados entre sí que pueden resultar de importancia crítica en su durabilidad, ya que se convierten en una vía de penetración por capilaridad o difusión, para los agentes agresivos externos. La capacidad de un fluido para moverse a través de la estructura de los poros del hormigón, depende de su microestructura (porosidad abierta), de las condiciones de humedad y de las propiedades del fluido (Olorunsogo & Padayachee, 2002).

Mediante los mecanismos de penetración mencionados ingresan los iones cloruro al interior del hormigón y generan la corrosión de las armaduras (Ann *et ál.*, 2009). La penetración de cloruros junto a la carbonatación, son los principales factores que disminuyen la durabilidad del hormigón (Mehta P. M., 2005). En hormigones totalmente saturados, el mecanismo predominante es el de difusión, mientras en hormigones parcialmente saturados el mecanismo asociado es de absorción capilar.

2.7 Determinación del coeficiente de difusión de cloruros D

La velocidad de penetración de los cloruros en el interior del hormigón y consecuentemente el tiempo que tardan estos iones en llegar a la armadura, están directamente relacionados con el coeficiente de difusión D (Basheer, 2001).

Cuando se determina el coeficiente de difusión de cloruros se diferencian dos situaciones posibles el estado estacionario y no estacionario del hormigón. El coeficiente de difusión en **estado no estacionario** D_{ns} , comúnmente llamado aparente (D_{app}), valora conjuntamente los iones cloruro transportados a través del hormigón y aquellos iones cloruro que son retenidos por las fases sólidas de la pasta de cemento. Por otro lado el coeficiente de difusión en **estado estacionario** D_s , también llamado efectivo (D_{eff}), hace referencia al transporte de cloruros en el hormigón en condiciones de flujo constante (Castellote M. A., 2001). Es decir cuando circula por un hormigón cuyas fases solidas ya no retienen iones cloruro adicionales.

Existen diversos métodos para la evaluación de este coeficiente, aunque el principio básico de procedimiento es el mismo, las variaciones de espesor de la muestra, los distintos valores de diferencia de potencial aplicados y de concentración en la solución de NaCl, hace que en ocasiones los resultados entre distintos métodos sean difíciles de comparar. Cuando el coeficiente de difusión se obtiene a partir de ensayos de laboratorio con una metodología básica, los métodos pueden ser clasificados como (CEB, 1998):

- Ensayos de difusión en estado no estacionario (Difusión aparente) - Inmersión
- Ensayos de difusión en estado estacionario – Célula de difusión
- Ensayos de migración en campo eléctrico – Ensayos acelerados

2.7.1 Ensayos de Inmersión

Para determinar el coeficiente aparente de difusión (D_{app} o D_{ns}) se utiliza el perfil de cloruros obtenido experimentalmente, analizando muestras de hormigón obtenidas a distintas profundidades. Algunos procedimientos de ensayo que permiten determinar el contenido de cloruros en hormigones en inmersión se describen en la ASTM-C1556-11; ASTM-C1543-10; ASTM C1152-04 y ASTM-C1218-08.

Además de analizar el perfil de concentración de cloruros en el hormigón, se puede determinar su coeficiente de difusión de cloruros a partir de la ley de Fick:

$$C_x = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right]$$

Donde C_s es la concentración en superficie, C_i es la concentración inicial y erf la función de error.

Diversos investigadores desarrollan modelos numéricos para la evaluación del coeficiente de difusión según los lineamientos de la segunda ley de Fick (Xiao *et ál.*, 2012) y algunos tienen en cuenta parámetros como la porosidad o el grado de saturación de los poros (Guzman, 2010).

Se debe distinguir entre los iones cloruro presentes en el hormigón, combinados o ligados y libres. Evidentemente la suma de los anteriores constituye los cloruros totales. Este es un ensayo en estado no estacionario pues al ocurrir por difusión natural, el hormigón aun retiene cloruros en las fases solidas de la pasta de cemento. Los resultados de este método no son siempre comparables con los otros tipos de ensayo (CEB, 1998), ya que en otros ensayos se determina el coeficiente de difusión estacionario (o efectivo D_{eff}).

2.7.2 Ensayos de Difusión

En estos una muestra de hormigón de 2,5cm de espesor se situó entre las dos compartimentos de un depósito A y B; una parte del depósito (A) contiene una solución de sal apropiada (cloruro) y la otra (B) inicialmente libre de cloruros (Bermúdez, 2007). Se mide la velocidad de difusión mediante el análisis a intervalos regulares de la concentración de la sal en el agua del otro compartimento inicialmente libre de ella (CEB, 1998). El coeficiente de difusión se obtiene de:

$$D = \frac{V \cdot l}{C_A \cdot S} \cdot \frac{DC_B}{Dt}$$

Donde V es el volumen de la solución en A, l es el espesor de la lamina del hormigón, C_A es la concentración de cloruros en A y S la superficie de la muestra expuesta a la solución. C_B corresponde a la concentración de cloruros en B tras un tiempo t , por lo tanto DC_B/Dt es la velocidad de variación de C_B con el tiempo.

2.7.3 Ensayos acelerados - Migración

En configuración similar a la de los ensayos de difusión, este tipo de ensayos establecen la aplicación de un campo eléctrico que genera una diferencia de potencial entre los dos compartimentos forzando el paso de cloruros a través de la muestra. Son más cortos y por lo tanto son los más empleados para determinar el coeficiente de difusión de cloruros en hormigones. Proporcionan una medida empírica, que solo puede emplearse para análisis comparativos (CEB, 1998). Los más importantes se describen a continuación:

El método de la **ASTM C1202**, uno de los más utilizados por los diferentes investigadores, aunque también criticado, es un método rápido que aplica hasta 60V con una solución de 3% NaCl (

- a. Figura 2.26). Algunos investigadores hacen referencia a que la alta tensión puede llegar a introducir calor, lo que a su vez cambia la velocidad del flujo (Nilsson, 1996).

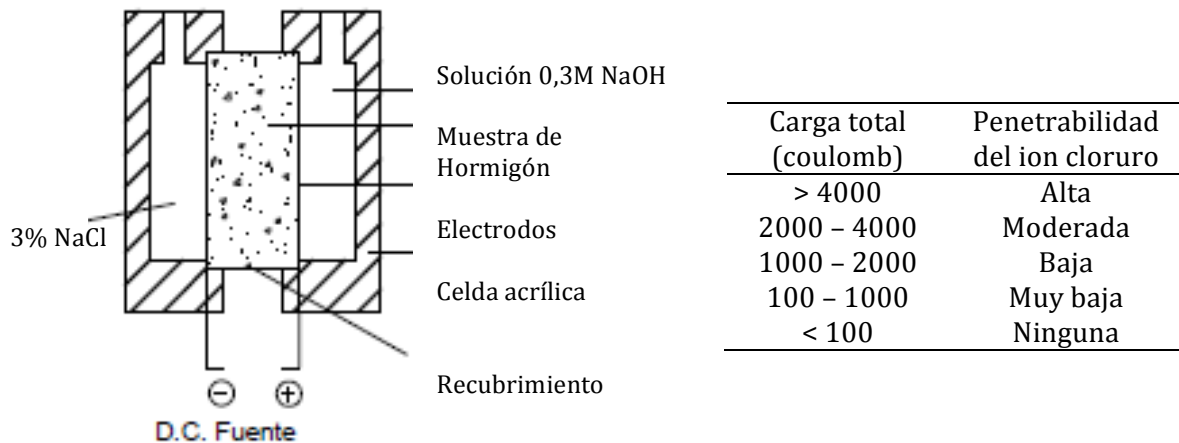


Figura 2.26. Ensayo ASTM-C1202 (2005).

b. **CTH Method**, es un método de evaluación propuesto por Tang y Nilson (Figura 2.27) que utiliza una solución de 3%NaCl en agua saturada de cal y donde se aplica un voltaje de 30V.

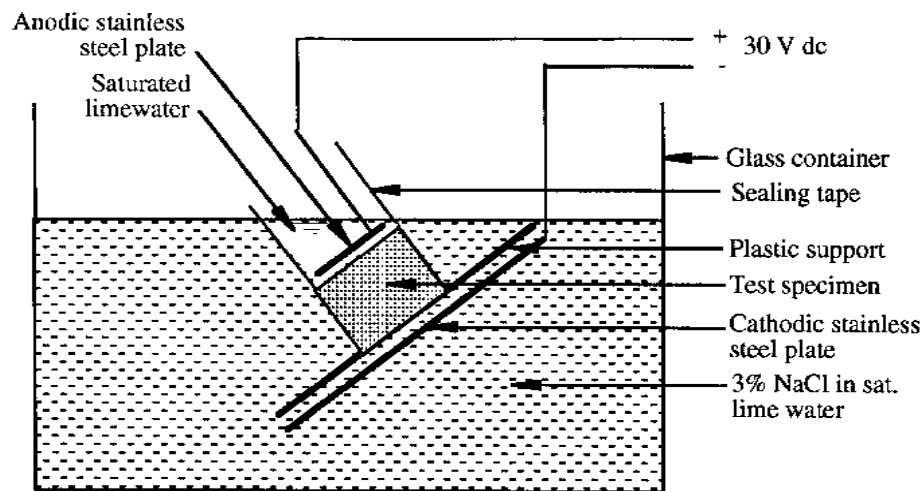


Figura 2.27. Método CTH (Tang, 1992)

La prueba puede durar hasta 48 horas dependiendo de la calidad del hormigón. Después de la prueba, la muestra se divide y las dos superficies fracturadas se rocían con una solución de $AgNO_3$. La profundidad de penetración de cloruros se determina a partir del cambio en el color obtenido debido a la formación de cloruro de plata en los cloruros presentes. El calculo del coeficiente de difusión se realiza a partir de la profundidad de penetración,

que cuenta con una constante de corrección para el cálculo del coeficiente de difusión ya que puede verse influenciada por la capacidad de fijación de los cloruros.

- c. El método propuesto en la normativa Nórdica **NT BUILD 492**, aprobada en 1999, es similar al CTH pero utiliza soluciones con distintos valores de concentración (Figura 2.28). Permite determinar el coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón para el estado no estacionario. Utiliza valores de potencial de 10, 30 o 60V y puede tardar unas 24 horas. Terminado el ensayo se divide la muestra en dos parte y se rocía con una solución de 0,1M AgNO_3 . Pasados 15 minutos se mide la profundidad de penetración de los cloruros y se calcula el coeficiente D_{nssm} .

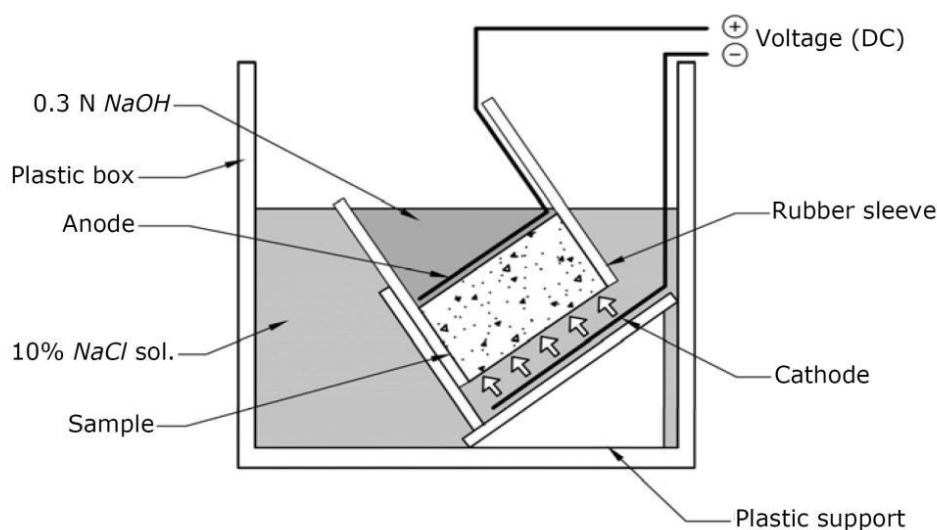


Figura 2.28. Ensayo Noruego (NT BUILD 492, 1999)

- d. Por su parte la norma UNE 83987 (2009), es un método de multi-régimen, que mide el coeficiente en estado estacionario y no estacionario, aplica la diferencia de potencial a una muestra que tiene en una de sus caras una solución 1M NaCl. El potencial eléctrico de 12V aplicado obliga a los iones cloruro a migrar a través de la muestra. La prueba se basa en medir la cantidad de cloruros que llegan a la parte libre de cloruros, por medio de la medición de conductividad de la solución (Figura 2.29).

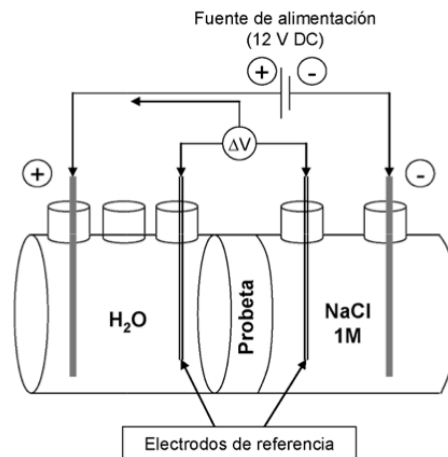


Figura 2.29. Esquema del ensayo de migración de cloruros (UNE 83987:2009).

2.7.4 Análisis de las metodologías propuestas para la determinación del coeficiente de difusión de cloruros

La comparación de los resultados obtenidos con distintos métodos no es fácil, incluso entre ensayos que siguen la misma técnica, como es el caso de los ensayos acelerados, ya que además de que el parámetro respuesta medido es variable, otros parámetros como el voltaje aplicado (Figura 2.30), las dimensiones de la probeta o la concentración de la solución (Tang & Sorensen, 2001) pueden ser influyentes.

Los ensayos acelerados de penetración de cloruros presentan distintas formas de medida según la metodología propuesta. Por un lado los ensayos de migración, como el ASTM-C1202, 2005, propone medir la carga eléctrica transportada, el método NT-BUILD-492, 1999 determina la distancia que han alcanzado los Cl desde la superficie y la norma UNE 83987, 2009 mide la variación de la conductividad en la disolución hacia donde se dirigen los iones. Mientras que un ensayo de difusión NT-BUILD-443, 1995 mide la concentración de cloruros en el compartimento de llegada.

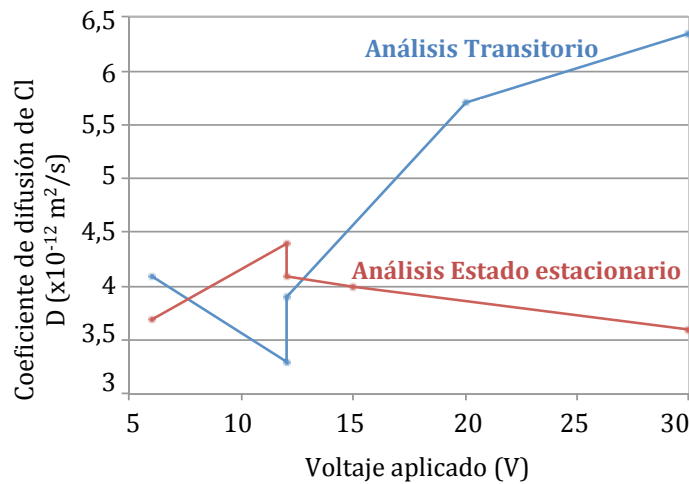


Figura 2.30. Influencia del voltaje en la determinación de los coeficientes de difusión, a partir de datos de (McGrath & Hooton, 1996)

Aunque muchos autores han tratado de establecer parámetros generalizados de medida comparando los distintos métodos (Andrade *et ál.*, 2000) no se han llegado a homogenizar criterios.

El ensayo rápido de permeabilidad de cloruros mide la concentración eléctrica de todos los iones y no solo del ion cloruro, debido al elevado voltaje que se llega a aplicar. El flujo podría no estar en condiciones estacionarias, por lo tanto los resultados podrían no reflejar la difusión real de cloruros en el hormigón, un aumento en la temperatura durante el ensayo incrementa la velocidad de conducción de iones y podría cambiar la microestructura. Arrojando un resultado exagerado (Liu & Beaudoin, 2000). Además puede ser fijada una menor cantidad de cloruros respecto a una exposición a largo plazo a ciclos de mareas en un ambiente marino.

En la Tabla 2.20 se presentan los valores de difusión de cloruro para el estado estacionario D_s , obtenidos del ensayo por difusión (The Concrete Society, 1988). Que son considerados como límites para clasificar un hormigón en función de su permeabilidad. Se incluye también una propuesta de Tang a partir de un ensayo de migración. Así mismo se presentan los valores obtenidos por Nilsson (Tabla 2.21) con un ensayo de migración en función de la relación a/c del hormigón. Comparando con las propuestas de Tang, incluso con valores de a/c 0,50 se obtienen hormigones con baja resistencia a la penetración de cloruros.

Tabla 2.20. Valores de coeficiente de difusión de Cloruros en el hormigón en función de su permeabilidad.

Referencia	Criterios	Clasificación	Coeficiente de difusión de Cloruros $D \times 10^{-8}$ (cm ² /s)
(The Concrete Society, 1988; CEB, 1998)	Difusión	Permeabilidad del hormigón	> 5
			1 – 5
			< 5
(Tang L., 1996)	Migración	Resistencia a la penetración de Cl	< 2
			< 8
			< 16
			> 16

Andrade *et ál.*, (1994) considera que los cementos tipo portland con relaciones a/c 0,4 a 0,6 presentan valores de difusión entre 0,5 y 1 x10⁻⁸ cm²/año, mientras que un hormigón de alta resistencia presenta valores de coeficiente de difusión inferiores a 0,1x10⁻⁸ cm²/año.

Tabla 2.21. Valores de coeficiente de difusión, estado estacionario, ensayos de migración (Nilsson, 1996) y valores propuestos por la EHE (Tabla A.9.4) para un CEM I y tiempo t=0,0767.

Relación a/c	Coeficiente de difusión de Cloruros $D \times 10^{-8}$ (cm ² /s)	
	Nilson (1996)	EHE (2008)
	0,35	11,4
0,40	15,2	8,9
0,45		10
0,50	16,3	15,8
0,55		19,7
0,60		25
0,75	23,0	

La UNE 83987:2009, permite determinar los coeficientes de difusión de cloruros, en los estados estacionario Ds y no estacionario Dns, en el hormigón endurecido. La precisión del ensayo en análisis de covarianza COV para Ds es 27,6% en repetitividad y de 67,6% en reproducibilidad, mientras que para Dns es de 24,7% y 47,3% respectivamente (Castellote M. A., 2006).

Todos los métodos son validos en la actualidad para el calculo del coeficiente de difusión, con sus ventajas y desventajas. En general, varios parámetros son importantes para llevar a cabo un ensayo adecuado donde obtener el coeficiente de difusión de Cloruros (Tabla 2.22).

Tabla 2.22. Parámetros importantes para seleccionar el ensayo de migración de cloruros.

Parámetro	Descripción
Voltaje	Debe ser lo suficientemente alto para acelerar la migración de iones, pero no demasiado, para evitar la generación de calor. Aunque una mayor cantidad de voltaje minimiza el tiempo de ensayo, puede ser adecuado utilizar valores entre 10 y 30 V (Basheer, 2001).
Concentración de la solución	Aunque la concentración de iones en el catolito no es un parámetro importante en el coeficiente de difusión, la bibliografía sugiere un 0,5 M (3%) de NaCl (RILEM, 1995; RILEM, 1994). Como anolito, puede ser adecuado el uso de agua destilada.
Tamaño de probeta	El espesor de la muestra debe ser 3.2 veces el tamaño máximo nominal del árido con el fin de evitar el movimiento de los iones a través de la zona de transición del hormigón. Evidentemente una muestra más gruesas requiere largos periodos de tiempo de ensayo.
Lecturas	Los electrodos deben estar lo más cerca posible de la superficie de las probetas con el fin de evitar cualquier caída de tensión en el electrolito

2.8 Mecanismos de transporte en el hormigón con árido reciclado

La disminución de la durabilidad del Hormigón con árido reciclado, se asocia con las grietas y fisuras, que se forman en el árido reciclado durante el proceso de producción, haciéndolo más susceptible a la penetración, la difusión y la absorción de fluidos (Olorunsogo & Padayachee, 2002).

2.8.1 Porosidad y permeabilidad

La permeabilidad de un hormigón con árido reciclado dependen de la porosidad del árido reciclado y del porcentaje de sustitución, variando entre el 15% y 70% respecto a la absorción del hormigón convencional (Barra, 1996).

Al evaluar la penetración de agua bajo presión no se reportan aumentos significativos por el uso de árido reciclado grueso de hormigón. La profundidad de penetración no sigue un patrón en función del aumento de la cantidad de árido reciclado en el hormigón. Un hormigón con 20% de árido reciclado puede tener una ligeramente menor penetración de agua que el hormigón de control (0%), y sin embargo aumentar cuando la sustitución del árido reciclado es del 50% viéndose de nuevo reducida para mayores sustituciones de árido reciclado (80% y 100%) (Zega & Di Maio, 2011). Este fenómeno se atribuye a una mejora en la interfase del hormigón con árido reciclado. Sin embargo, se plantea que el ensayo para la determinación de la penetración de agua bajo presión presenta limitaciones para evaluar este tipo de hormigón (López-Gayarre *et ál.*, 2011).

La absorción de un hormigón con áridos naturales (0%) se encuentra entre 4-6% y aumenta entre 6,5-8,5% cuando se sustituye un 100% de árido reciclado grueso, produciéndose un incremento de 40-60% (Levy & Helene, 2004; Malašev *et ál.*, 2010; Soutsos *et ál.*, 2011). Es lógico recordar que la absorción de agua se reduce cuando se utilizan bajas relaciones a/c, alrededor de 0,45. (Paine & Dhir, 2010; Somna *et ál.*, 2011). El uso de árido reciclado fino, presenta un impacto significativo sobre esta propiedad, creando más capilares (Evangelista & de Brito, 2010), lo que se traduce en un aumento de la tensión capilar en los hormigones con árido reciclado y un cambio en la estructura de poros. La absorción de agua aumenta entre un 46 y 73% para hormigones con áridos reciclados finos y gruesos (Levy & Helene, 2004; Somna *et ál.*, 2011), aunque también se encuentran datos en la bibliografía que llegan a diferencias entre 15% (Yaprak *et ál.*, 2011) y 180% (Soutsos *et ál.*, 2011).

La porosidad es el factor clave en la absorción de agua del hormigón con árido reciclado (Malašev *et ál.*, 2010) y presenta valores entre el 4-16% mayor hormigón de control (Gomez-Soberon, 2002; Corinaldesi & Moriconi, 2009; Kou *et ál.*, 2011). La mayor porosidad del hormigón reciclado se debe a la mayor porosidad del árido

reciclado (Katz, 2003) a causa del mortero adherido que presentan (Etzeberria *et ál.*, 2006). Los rangos de porosidad que se encuentran en la bibliografía varía entre 12 y 22% para sustituciones del 100% de árido grueso reciclado (Sánchez M. , 2004). En general no es la porosidad total el parámetro que interesa conocer, sino aquella porción de la misma que está conectada con el exterior, es decir, la porosidad abierta. En función de la porosidad, el CEB clasifica los hormigones como se presenta en la Tabla 2.23.

Ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) en hormigón reciclado, muestran aumentos en el volumen total de poros, sobre todo en los poros más grandes (>100 nm) en función de la edad del hormigón y la cantidad de mortero adherido al árido reciclado (Uchikawa & Hanehara, 1996).

Tabla 2.23. Calidad del hormigón según su porosidad (CEB, 1998).

Porosidad (%)	Calidad del hormigón
< 15%	Buena
15-17%	Media
> 17%	Pobre

Sin embargo también se dice que el hormigón reciclado presenta una mayor cantidad de microporos (<0,05 μm) lo que aumenta la tensión capilar (Kou *et ál.*, 2011), además se ha demostrado que la calidad del árido reciclado es muy influyente en la absorción, ya que una pequeña cantidad de impurezas (< 1%) puede llegar a incrementar la absorción hasta en un 75% respecto a un hormigón reciclado sin impurezas (Poon & Chan, 2007).

La porosidad a largo plazo se reduce en mayor medida para un hormigón con árido reciclado frente a un hormigón con árido natural. Se ha encontrado que después de 5 años la porosidad puede reducirse desde un 7% hasta en un 45% para un hormigón reciclado, según las características y calidad del árido reciclado (Kou *et ál.*, 2011).

Evidentemente el aumento en la cantidad de cemento o la incorporación de adiciones como cenizas volantes, mejora la red de poros, disminuyendo la absorción del hormigón y por lo tanto se reduciendo la permeabilidad (Corinaldesi & Moriconi, 2009).

Aunque la penetración de agua bajo presión no es el principal mecanismo de transporte para el hormigón expuesto a una zona de mareas o a una zona sumergida, es un ensayo que permite obtener buenos coeficientes de correlación para hormigón en zona de mareas y sumergido (Bermúdez & Alaejos, 2008).

La Instrucción EHE (Ministerio de Fomento de España, 2008), en su artículo 37.3.2., establece que un hormigón expuesto a un ambiente IIIa y IIIc (ambiente marino) se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente la restricción de profundidad máxima menor o igual que 50 mm y la profundidad media menor o igual que 30 mm, realizando el ensayo según la norma UNE EN-12390-8, 2009.

2.8.2 Succión capilar

Para cuantificar la succión capilar del hormigón se determina la absortividad (Sorptivity en ingles), o el coeficiente de absorción capilar k , que representa la velocidad de succión capilar a la cual un fluido asciende por la estructura del hormigón. Se calcula como la pendiente de la recta obtenida por regresión lineal, que define la absorción por unidad de superficie (Kg/m^2) versus la raíz cuadrada del tiempo ($\sqrt{\text{min}}$). También puede obtenerse la resistencia a la penetración del agua (m), por medio de las curvas de absorción capilar (Fagerlund, 1982).

Como ya se ha dicho hace referencia a la entrada de agua en los poros en condiciones no saturadas debido a la succión capilar. Varios autores han abordado este tema para hormigones con áridos reciclados, encontrando en la mayoría de los casos que la succión del hormigón con áridos reciclados aumenta respecto a un hormigón con árido natural, entre 3,7% (Katz, 2003), y 7,12% (Gomez-Soberon, 2002), siendo mayor a medida que incrementa el porcentaje de árido reciclado en el hormigón y disminuyendo a medida que aumenta la edad (Olorunsogo & Padayachee, 2002). Sin embargo, algunas investigaciones presentan resultados en los que el hormigón con áridos reciclados presenta valores de succión capilar similares a un hormigón convencional (Ng *et ál.*, 2006) debido al proceso de

amasado, el cual como hemos visto previamente tienen una gran influencia en las propiedades del hormigón, mejorando la zona de interface.

La presencia de áridos reciclados influye sobre la succión capilar del hormigón, sin embargo, es la matriz, quien juega un papel definitivo, por lo que el uso de una cantidad de cemento alta permite obtener una matriz más compacta y por lo tanto una mayor calidad en la interfase, lo que limita la influencia del árido reciclado en el transporte de agentes agresivos en el hormigón (Gonçalves *et ál.*, 2004).

2.8.3 Difusión - Penetración de Cloruros

Los cloruros se ubican en los poros interiores del hormigón parcial o totalmente llenos de agua, donde parte de estos iones son enlazados por los componentes del cemento mediante mecanismos químicos (reacción) y físicos (adsorción) (Mejía & Rodríguez, 1999). La difusión de cloruros en el hormigón puede llegar a generar reacciones químicas que se traducen en grietas y desprendimientos, debido a que se produce un fenómeno electroquímico en el acero de refuerzo embebido trayendo como consecuencia la corrosión de las armaduras metálicas del hormigón, cuyo riesgo dependerá de la resistencia del hormigón a la penetración del anión cloruro y su capacidad de enlace, puesto que solo aquellos iones libres (no enlazados) serán los verdaderamente agresivos para las armaduras.

Cuando un hormigón se encuentra en contacto con un ambiente marino es importante conocer si pueden llegar a existir efectos de despasivación de la armadura que lleven a la corrosión. Con el propósito de conocer la microestructura del hormigón para estimar el tiempo de la iniciación a la corrosión del acero de refuerzo embebido, el mecanismo de difusión es analizado con la determinación del coeficiente de difusión de cloruros D , considerado como un parámetro muy importante para evaluar el transporte de cloruros en el hormigón (Tang L. S., 2001).

En la bibliografía no se encuentran muchos datos sobre los valores de difusión de cloruros para hormigones con áridos reciclados. Algunos autores presentan valores de difusión de cloruros, utilizando distintos métodos de ensayo, el más

común es el método ASTM C1202 (Zhu, 2011) (ver 2.7.3). Un método desarrollado en la Universidad Cape Town (Streicher, 1996) (ver 2.7.3) donde se aplica una diferencia de potencial de 10 V en una solución de cloruro de sodio 5M NaCl, se ha utilizado para el análisis de la conductividad de los cloruros a través del hormigón con árido reciclado, encontrando que la conductividad aumenta a medida que aumenta el contenido de árido reciclado en el hormigón (Olorunsogo & Padayachee, 2002). Se establece que se observa una menor conductividad al aumentar la edad del hormigón.

Gonçalves *et ál.*, (2004), utiliza el método CTH (ver 2.7.3) para la evaluación de la penetración de cloruros en el hormigón con áridos reciclados y concluye que la menor resistencia al ingreso de agentes agresivos, puede verse compensada por la habilidad del árido reciclado a combinarse con CO₂ y cloruros, reduciendo la velocidad de penetración, dando lugar a valores de coeficiente de difusión aceptables cuando se utiliza 450 kg/m³ de cemento.

Por otro lado Berndt (2009) ha evaluado el coeficiente de difusión de cloruros a partir del perfil de cloruros en el hormigón, siguiendo la norma ASTM C1556 (ver 2.7.1), con el objetivo de validar el uso de los áridos reciclados para hormigón en cimentaciones de aerogeneradores marinos u otras aplicaciones similares. Para este caso se ha utilizado una solución de agua de mar con una concentración de 165 g/lit de NaCl. Se ha evaluado el uso de escorias con el propósito de mejorar las propiedades del hormigón con árido reciclado. Para el caso de hormigones sin adiciones obtuvo un coeficiente de difusión de cloruros cuando utilizó un 100% de áridos reciclados solo un 15,8% mayor que el obtenido con hormigón convencional. El coeficiente de difusión de cloruro para un hormigón durable expuesto un año al agua de mar está generalmente por el orden de 10⁻⁹ o 10⁻⁸ cm²/s. Esto significa que protegerá a la armadura embebida en el hormigón del ingreso de iones cloruro y por lo tanto de la corrosión. En este estudio, el uso de áridos reciclados causa un incremento del coeficiente de difusión de cloruros, mitigado evidentemente por el uso de escorias que con gran eficacia también actúa para las mezclas con áridos naturales. Un mayor contenido de cemento también puede mejorar esta propiedad, además del efecto combinado de reemplazos parciales de cemento con el uso de áridos reciclados.

El uso de materiales puzolánicos, como ceniza volante, humo de sílice o escoria, como sustitución de una parte del cemento (cerca del 25%), es efectivo en la disminución del coeficiente de difusión de cloruros en hormigones con árido reciclado para relaciones a/b (b, binder se refiere al cemento más las adiciones minerales) entre 0,35 y 0,60 (Qin, 2011).

Con el objetivo de disminuir el coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón con áridos reciclados, se ha estudiado la posibilidad de utilizar agua con sileno, en forma de agente repelente, (Zhu, 2011) observando en todos los casos una disminución de la capacidad de absorción del hormigón con árido reciclado y por lo tanto una mejora en su durabilidad, viéndose disminuido a su vez el coeficiente de difusión de cloruros.

Por su parte Corral-Higuera, *et ál.*, (2011) estiman que para el hormigón con 100% de árido reciclado, la permeabilidad al ion cloruro es alta (>4000 Coulomb), dentro de la clasificación cualitativa que presenta la ASTM C1202. En su investigación el uso de humo de sílice y ceniza volante mejora la capacidad del hormigón frente a la penetración de cloruros. El hormigón con árido reciclado, sin adiciones presenta un valor de paso de carga de 6000 coulomb, sin embargo, el hormigón de control con árido natural, también se encuentra en esta categoría aunque con un menor valor de carga 4250 coulomb. En los estudios realizados por Ann, también obtienen una alta penetrabilidad en el hormigón con áridos reciclados, sobre 6500 coulomb frente 3900 para el hormigón convencional. En este caso analizó el uso de materiales puzalánicos en hormigón con áridos reciclados como ceniza de combustible y escorias de altos hornos (Ann *et ál.*, 2008).

La dispersión y variedad de resultados lleva también a encontrar que la profundidad de penetración de los cloruros en hormigón expuesto a una solución de 3%NaCl por 28 días fue mayor en el caso en el que se utilizó árido natural, 10mm frente a 9mm para un hormigón con árido reciclado (Otsuki, *et ál.* 2003). Para este estudio, se analizó también el procedimiento de mezclado, utilizando en el caso de árido reciclado un método de doble mezcla, que proporciona el agua a la mezcla en dos etapas, permitiendo fijar una menor relación agua cemento alrededor de los áridos reciclados, mejorando de esta manera sus propiedades.

Por una parte (Berndt, 2009), (Qin, 2011), (Zhu, 2011) han utilizado los áridos reciclados en condiciones de saturado superficie seca. Asegurar esta condición en los áridos, no es tarea fácil y pueden presentarse grandes variaciones debido a que realmente en la mezcla existe más agua de la que se cree.

Gonçalves, *et ál.*, (2004) por su parte, han introducido los áridos reciclados en estado seco, dejando previamente a la mezcla, todos los áridos finos y gruesos con la tercera parte del agua de dosificación durante 30 minutos.

Xiao *et ál.* (2012) presenta algunos valores de la bibliografía para el coeficiente de difusión de cloruros D_s en hormigones con árido natural y reciclado (Figura 2.31), donde la mayoría se encuentran por debajo de 7×10^{-8} cm²/s para relaciones a/c menor que de 0,5 excepto los datos de Hu (2009) quien obtiene valores mayores, sin embargo para todos la tendencia está marcada por la relación a/c del hormigón.

En general, el coeficiente de difusión para hormigones con árido reciclado presenta un mayor rango de dispersión para valores entre 10^{-8} - $1,8 \times 10^{-7}$ cm²/s debido principalmente a la influencia del mortero adherido y a la antigua interfase, mientras que el coeficiente de difusión para el hormigón con árido natural se mueve entre 10^{-8} - 10^{-7} cm²/s. Los investigadores de este trabajo estiman los coeficientes de difusión para las distintas partes del hormigón reciclado presentados en la Figura 2.32 donde se observa la gran influencia de la antigua interfase.

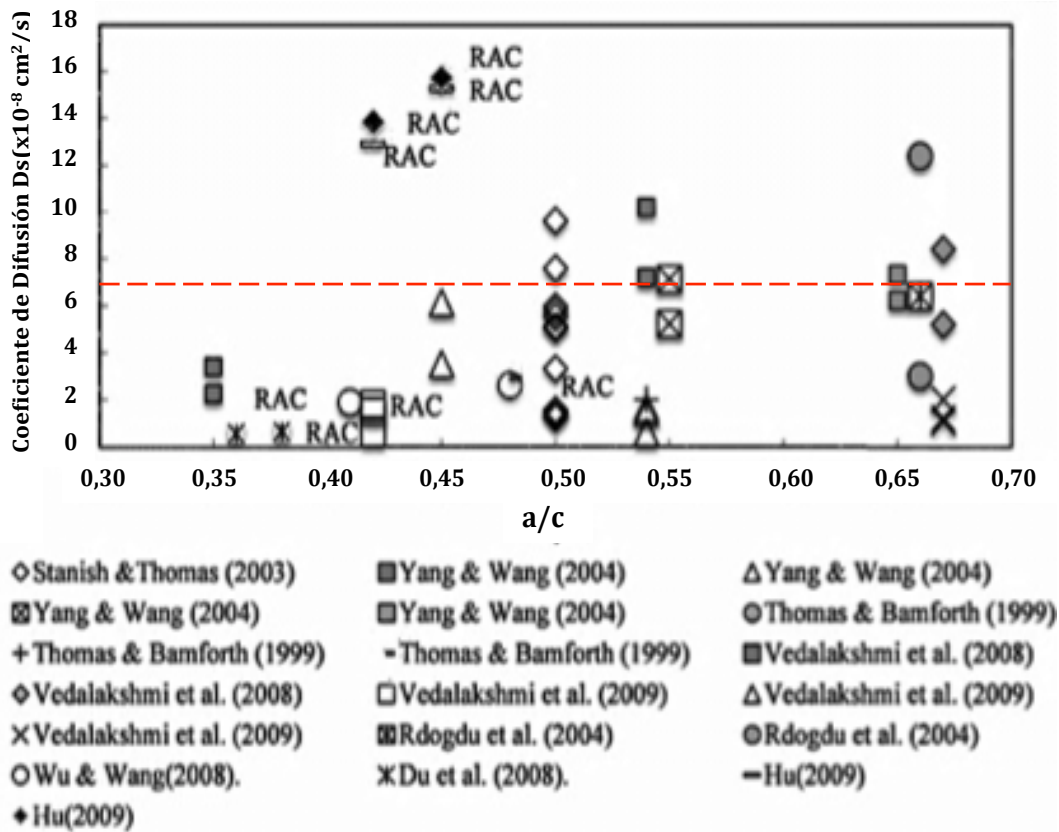


Figura 2.31. Coeficientes de difusión de hormigones con árido natural y árido reciclado (Xiao *et al.*, 2012).

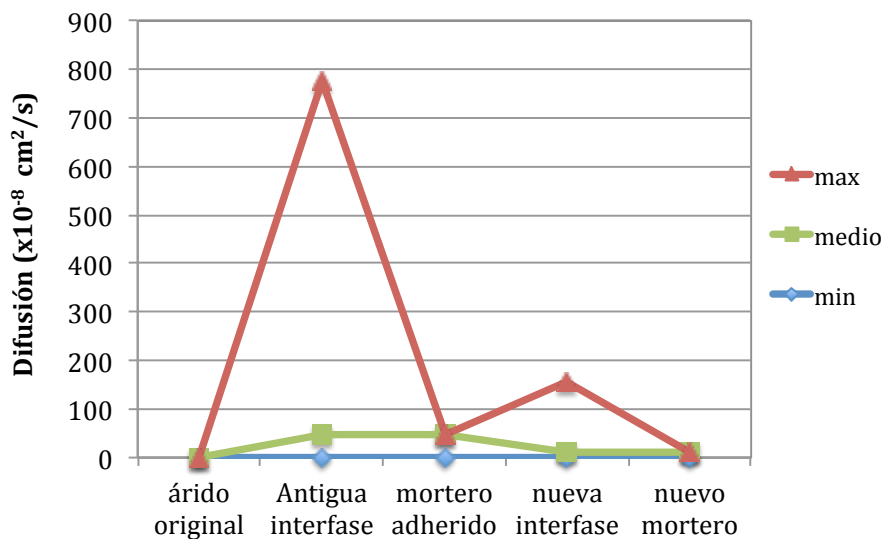


Figura 2.32. Valores del coeficiente de difusión estimado para los distintos componentes del hormigón con árido reciclado (Xiao *et al.*, 2012).

2.9 El proceso de corrosión de armaduras en el hormigón

En general los procesos que afectan la corrosión de armaduras están controlados por procesos de difusión, por lo tanto el factor principal de protección es la calidad del hormigón de recubrimiento.

La corrosión de armaduras se fundamenta en un fenómeno electroquímico originado por la presencia de heterogeneidades en la superficie de los metales, que producen zonas de diferentes niveles de energía y dando lugar a una celda electroquímica. El ataque de la corrosión por cloruros comienza con la picadura en puntos débiles de la interfase acero/hormigón y puede generalizarse si el contenido en cloruros es suficientemente alto (Zhang *et ál.*, 2010).

Dos condiciones son necesarias para que ocurra la corrosión, por un lado debe existir una diferencia de potencial entre la superficie anódica y catódica, y por el otro un medio que sea capaz de mantener el proceso catódico. Así uno de los dos metales o alguna de las partes del metal (cuando solo hay uno), se convierte en ánodo y el otro en cátodo (Figura 2.33).

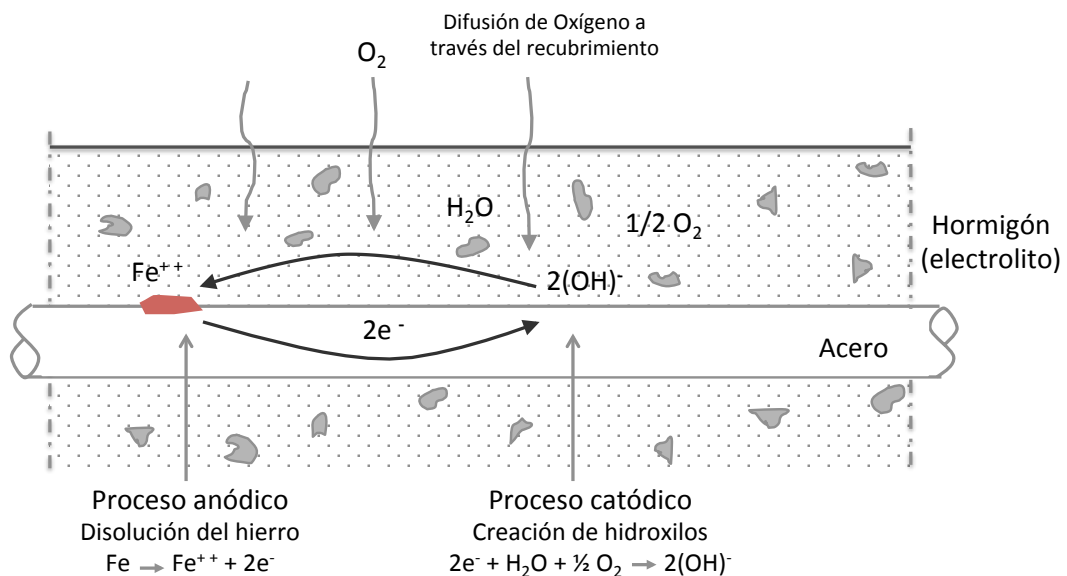
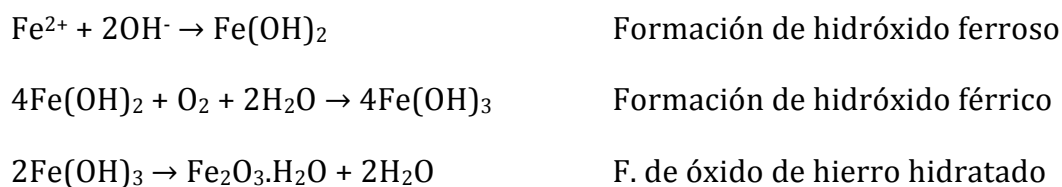


Figura 2.33. Corrosión de armaduras en el hormigón. Pila de corrosión.

En general, para que tenga lugar este fenómeno es indispensable la presencia de los siguientes elementos (Guzmán, 2010):

1. Un ánodo. Zona de la superficie metálica donde se lleva a cabo la reacción de oxidación, el metal se disuelve en iones liberándose electrones. $Me \rightarrow Me^{+z} + ze^{-}$
2. Un cátodo. Zona donde se recogen los electrones libres para mantener el equilibrio eléctrico. Se lleva a cabo la reacción de reducción. $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$ (pH<7) ; $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ (pH>7)
3. Un conductor eléctrico donde fluyen los electrones desprendidos de ánodo
4. Un conductor iónico (electrolito), es la solución acuosa que permite el transporte de cationes provenientes de la reacción de disolución del ánodo.

El proceso anódico no se produce hasta que la capa protectora del acero se hace permeable por la acción de los iones cloruro siendo necesario un medio en el que se disponga de una cantidad suficiente de oxígeno y agua (Mehta & Monteiro, 1986), ya que cuando no existe suficiente oxígeno, no se forma óxido expansivo y por lo tanto no se puede desarrollar la formación de hidróxido férrico. Las reacciones que se producen son (Sandberg, 1998):



La transformación del hierro metálico en óxido viene acompañada de un incremento de volumen que puede llegar a ser del 600% del tamaño original del metal, causa de la expansión y fisuración del hormigón (Gálligo Estévez, 1998).

Dentro de los factores que influyen en la corrosión además del espesor del recubrimiento, se encuentran la relación a/c, el contenido de cemento, tipo de cemento, el estado superficial del acero, las condiciones ambientales, la resistividad eléctrica, contenido de cloruros, fisuración del hormigón y el estado tensional del hormigón (Bermúdez, 2007).

Los potenciales electroquímicos que forman las pilas de corrosión se pueden generar de dos formas (Mehta & Monteiro, 1986):

1. Pilas de composición: cuando se colocan dos metales diferentes dentro del hormigón
2. Pilas de concentración: debido a diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero (como álcalis, cloruros u oxígeno).

El hormigón es un material muy heterogéneo química y físicamente tanto a escala microscópica como macroscópica. Las diferencias microscópicas pueden inducir a la formación de micropilas electroquímicas, caracterizadas por una pequeña distancia entre zonas anódicas y catódicas en la superficie del acero, donde el ánodo y el cátodo están en la misma armadura. Por otro lado las diferencias macroscópicas pueden desarrollar macropilas electroquímicas donde el ánodo se localiza en la armadura y el cátodo a cierta distancia, o incluso en otra armadura, generando una corriente galvánica (Guzmán, 2010).

Según la localización de las zonas anódicas y catódicas, y la posible existencia de tensiones mecánicas importantes, la corrosión puede definirse como generalizada o localizada.

La corrosión localizada es producida normalmente por cloruros o por una elevada tensión mecánica que llega a generar fisuras. Sucede cuando los cloruros penetran hasta alcanzar la armadura en un punto, produciéndose una “picadura” en la interfase acero/hormigón. Este fenómeno da pie a la despasivación de pequeñas áreas de la superficie, generándose una reducción local de la sección de la armadura. Un punto débil se puede generar debido a una caída local del pH, un hueco de aire por mala compactación, una fisura del hormigón o un defecto de la superficie del acero (Bermúdez, 2007). Este tipo de corrosión también es llamada galvánica.

La corrosión generalizada se desencadena cuando el ataque avanza como un frente que afecta toda la superficie de la armadura produciéndose un descenso en la alcalinidad del hormigón. Suele ocurrir debida a la carbonatación, aunque también puede ser originada por una picadura que puede generalizarse cuando el contenido de cloruros es suficientemente alto (Zhang *et ál.*, 2010).

En condiciones normales, el acero embebido en el hormigón cuenta con una protección física, proporcionada por el espesor del recubrimiento y una protección química debida al pH alcalino del hormigón, que presenta valores habituales de 12-13 y sitúa al acero en la zona de pasividad del diagrama de Pourbaix (Figura 2.34). Marcell Pourbaix desarrollo un diagrama (Pourbaix, 1966) que representa el potencial electroquímico de un metal y sus características particulares en una disolución electrolítica, a partir del pH de la disolución.

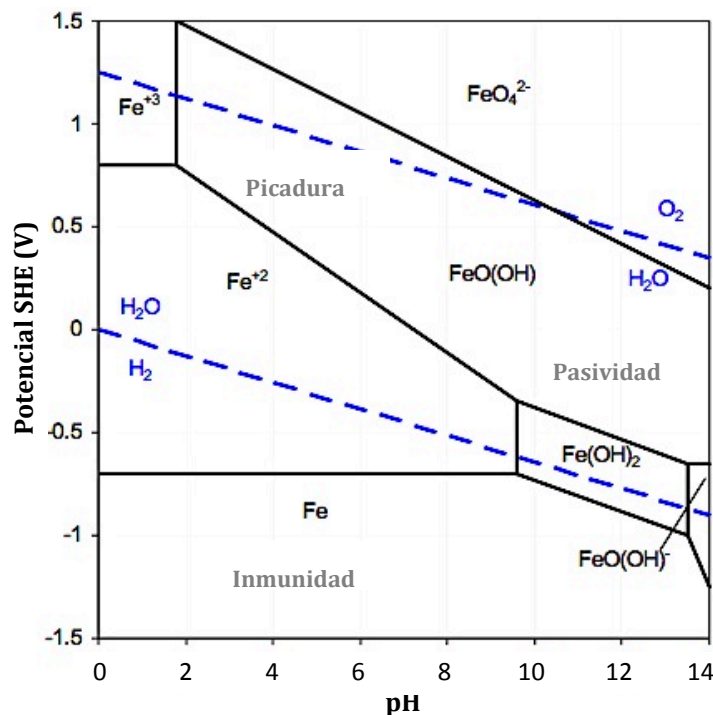


Figura 2.34. Diagrama de equilibrio Potencial/pH de para acero en solución acuosa Fe-H₂O a 25°C (Pourbaix, 1966).

En el diagrama se pueden diferenciar tres zonas: corrosión, pasivación e inmunidad. En general un recubrimiento adecuado del acero de refuerzo, se convierte en la mejor protección de tipo químico (pasivante) y físico (aislante).

En la zona de pasivación, los hidróxidos de hierro forman una capa protectora en la superficie del metal, que reduce su actividad química y por lo tanto su velocidad de corrosión (formación de sólidos insolubles). La capa formada en la superficie del acero, es una capa protectora de óxido Fe₂O₃ de espesor muy pequeño, del orden de 100.000 Å, que impide la corrosión (BRE, 2000).

En la zona de inmunidad, el metal es termodinámicamente estable y no sufre corrosión (Fe^0), mientras que en la zona de corrosión (productos solubles), el hierro se encuentra como ion, generando un ambiente propicio para la disolución del metal (Sandberg, 1998).

La conexión metálica para que se genere el flujo de electrones del ánodo al cátodo, está dada por el propio sistema de la armadura metálica, mientras la electrolítica corresponde al hormigón, por lo tanto, la velocidad de corrosión se ve influenciada por factores como (Ahmad, 2003):

1. El pH del electrolito, afectado por la carbonatación
2. La disponibilidad de oxígeno y de agua capilar, por lo tanto, una inmersión total no representa un riesgo verdadero para la armadura.
3. La concentración de Fe^{2+} en el hormigón junto a la armadura

Un parámetro importante para evaluar el potencial daño de la corrosión es la velocidad de corrosión del acero, que cuando se encuentra en estado pasivo es de $0,1\mu m/año$, pero al despasivarse, es decir cuando el acero tiende a corroerse la velocidad llega a incrementarse alrededor de tres veces (ACI Committee 222, 2001; RILEM, 1988).

Los diagramas de Evans constituyen un método gráfico para relacionar la velocidad de corrosión con los valores de potencial de los electrodos. En abscisas se representa el logaritmo de la corriente y en ordenadas el potencial de electrodo. El fenómeno de variación de dicho potencial al paso de una corriente, se conoce como polarización, y en su versión más simple se representa por una recta en el diagrama de Evans (Figura 2.35). La intersección de las dos curvas de polarización define el potencial de corrosión E_{corr} y la intensidad de corrosión I_{corr} , satisfaciendo la condición de la inexistencia de corrientes externas (Guzman, 2010).

Para estimar la vida útil de una estructura de hormigón armado, es necesario conocer la velocidad con la cual se corroe el acero embebido en el hormigón. Existen mecanismos presentes en la corrosión metálica y su evolución en el tiempo como los procesos de polarización (Guzman, 2010):

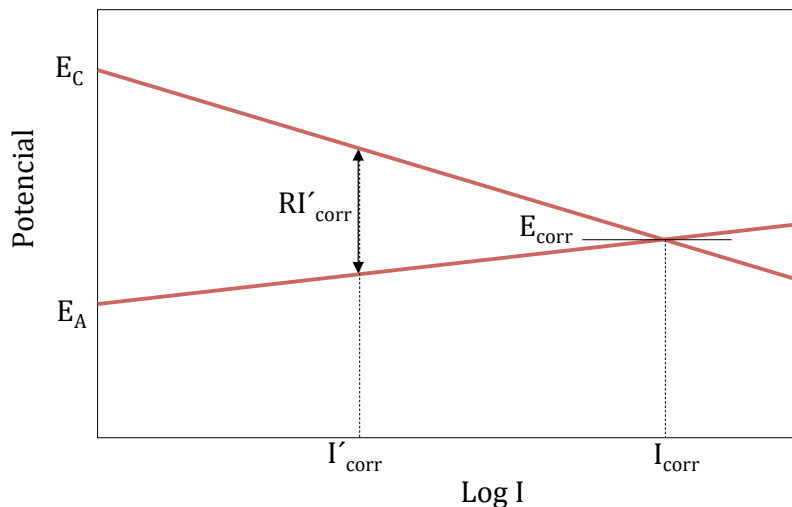


Figura 2.35. Diagrama esquemático de Evans (Evans, 1960). (E_A y E_C : potenciales de electrodo para el ánodo y el cátodo; E_{corr} e I_{corr} : potencial e intensidad de corrosión).

1. Polarización de activación. Asociada a la energía de activación de las reacciones químicas en la superficie de los electrodos. La relación logarítmica resultante es conocida como la ley de Tafel.
2. Polarización de concentración. La velocidad de difusión del ion hacia el electrolito limita la velocidad de reacción o la de alguna otra especie que intervenga en la reacción. Afecta fundamentalmente al cátodo, donde aparece una intensidad límite que es inversamente proporcional al espesor de la capa estanca de difusión próxima a la superficie del electrodo.
3. Polarización de resistencia. Se debe a la formación de películas en la superficie del electrodo que implica una resistencia óhmica y la consiguiente caída de potencial.

Algunos investigadores a partir de experiencias previas en laboratorio han desarrollado formas de medir la velocidad (I_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}) y han propuesto valores límites que pueden clasificar el riesgo de corrosión de la armadura como se presenta a continuación.

2.9.1 Medida de la corrosión

Inicialmente la corrosión se determinaba mediante una inspección visible del deterioro o en la medición directa del deterioro por técnicas gravimétricas (medición directa de pérdida de peso). Pero estos procedimientos mostraron grandes problemas debido a los exagerados tiempos necesarios para obtener respuesta (González & Miranda, 2007).

Durante los últimos años se han desarrollado técnicas no destructivas, referidas a la aplicación de uno o varios electrodos de trabajo, que permiten monitorizar los procesos de corrosión de las armaduras. Por lo tanto es posible determinar potenciales de media pila (ASTM-C876, 2009), resistencia de polarización lineal LPR (ASTM G 59-97) o espectroscopia de impedancia electroquímica EIE. González & Miranda (2007) comparan las técnicas comúnmente empleadas y resumen sus ventajas y desventajas (Tabla 2.24).

(Stern & Geary, 1957) introdujeron los métodos electroquímicos cuantitativos de medida de la corrosión, apoyándose en el método de pilas locales de corrosión propuesto por (Evans, 1960) y en la teoría del potencial mixto demostrada por (Wagner & Traud, 1938) para el potencial de corrosión (E_{corr}).

Entre las técnicas electroquímicas se destaca la resistencia a la polarización lineal por su simplicidad y facilidad de implementación, siendo una de las técnicas más utilizadas comercialmente.

La velocidad de corrosión informa sobre la cantidad de metal que pasa a óxido por unidad de tiempo y superficie de armadura expuesta al ataque. La cantidad de óxido generada por la corrosión repercute directamente en la fisuración del recubrimiento y en la pérdida de la adherencia armadura/hormigón, mientras que la disminución del área transversal de la armadura afecta la capacidad portante de la estructura. Por lo que se considera la velocidad de corrosión como un indicador importante sobre la capacidad portante de la estructura.

Tabla 2.24. Técnicas experimentales de estudio de la corrosión, ventajas e inconvenientes principales (González & Miranda, 2007).

Método	Ventajas	Desventajas
<p>Medida directa de la corrosión</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gravimétricos: Medida de la pérdida o ganancia de peso. • Analíticos: Medida de la concentración de componentes metálicos en solución. • Volumétricos: Medida del H₂ desprendido, o del O₂ consumido en los procesos catódicos, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medida directa de la corrosión • No requieren un especialista para su interpretación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Largos tiempos de exposición con resistencias a la corrosión elevadas • Valores integrales para el periodo de tiempo considerado. • Baja seguridad y reproducibilidad.
<p>Ensayos acelerados de corrosión</p> <ul style="list-style-type: none"> • De niebla salina • De niebla salina acética • De atmosfera industrial • Inmersión en agentes agresivos (Cl⁻) • Cámaras de carbonatación • otros 	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados en plazos de tiempo razonables, si se multiplica la agresividad del ambiente natural. • Útiles para comparar, en la selección de materiales o a efectos normativos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden cambiar el mecanismo de corrosión. • La dispersión de los resultados presenta un amplio rango. • Sin el establecimiento de coeficientes de correlación es imposible estimar la durabilidad.
<p>Métodos Electroquímicos</p> <p>a) Estacionarios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Métodos de intersección • Resistencia a la polarización • Curvas de polarización. Potenciales críticos, potenciometrías, etc. <p>b) No estacionarios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de impedancia • Métodos de impulsos • Ruido electroquímico • Métodos potenciodinámicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta sensibilidad en la medida de potencial y densidad de corriente. • Rápidos y dan información diferencial sobre velocidades instantáneas de corrosión. • Permiten observar la evolución de la corrosión en el tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbación del sistema por la polarización aplicada • Estimación indirecta de la corrosión, es necesario un contraste y un conocimiento del proceso para la interpretación de los resultados. • Métodos aproximados, fiables si se aplican correctamente, pero no exactos.

La velocidad o intensidad de corrosión I_{corr} hace referencia a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo ($\text{g/cm}^2 \text{ día}$), aunque electroquímicamente se puede definir como ($\mu\text{A/cm}^2$) o (mm/año).

Stern & Geary (1957) demostraron que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño incremento de potencial de corrosión y que su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión:

$$I_{corr} = \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p}$$

Donde B es una constante (mV)

R_p es la resistencia a la polarización ($\Omega \text{ cm}^2$)

I_{corr} es la velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Donde B es una constante que depende de las pendientes de las curvas Tafel y varía entre 13 y 52 mV, mientras que a R_p se le denomina resistencia a la polarización, por tener dimensiones de resistencia. La R_p resulta de aplicar una pequeña perturbación a las armaduras y medir el cambio de potencial o intensidad que se produce.

La medición de la resistencia a la polarización del acero de refuerzo embebido en el hormigón, actualmente se puede realizar mediante un sistema de tres electrodos (Figura 2.36), que corresponden a un electrodo de trabajo (refuerzo), un electrodo de referencia (media celda) y un electrodo auxiliar (electrodo inerte), el potencial del electrodo activo se mide con relación al electrodo de referencia. El electrodo auxiliar simplemente completa el circuito para que fluya la corriente.

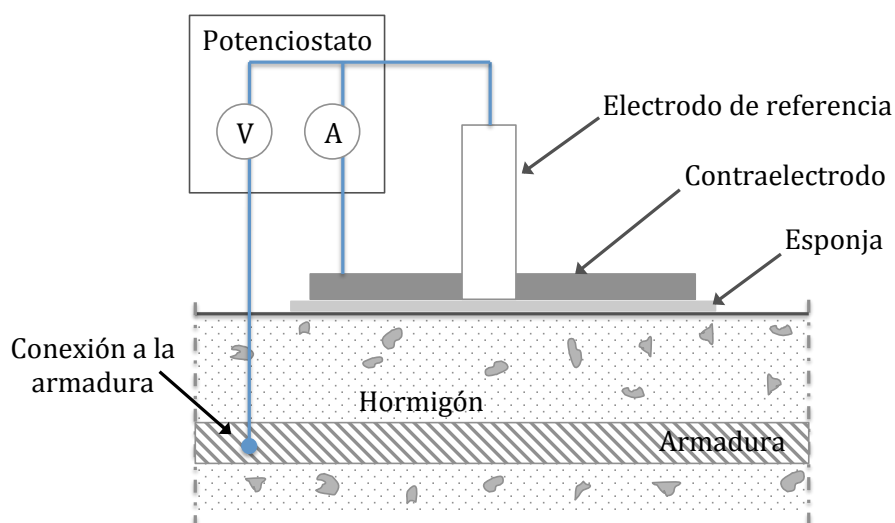


Figura 2.36. Esquema del ensayo de resistencia a la polarización lineal con tres electrodos (BRE, 1998).

2.9.1.1. Medida del potencial de media pila

El potencial de corrosión determina la probabilidad de corrosión de la barra respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄). El criterio establecido por la ASTM para la interpretación del potencial de media pila utilizado en la evaluación de la corrosión de armaduras se presenta en la Tabla 2.25.

Tabla 2.25. Probabilidad de corrosión según criterio de la ASTM-C876, 2009.

Potencial del acero E (mV)	Probabilidad de corrosión activa
Más positivo que -200mV	< 10% (Riesgo bajo)
Entre -200 mV y -350mV	Desconocido/ incierto
Más negativo que -350mV	Más del 90% (Riesgo alto)

La interpretación debe realizarse con precaución, teniendo en cuenta que esta clasificación se ha basado en los resultados empíricos obtenidos a partir de datos de tableros de puentes americanos expuestos a sales fundentes. Un parámetro de apoyo importante es la evaluación de la resistividad, también puede influir la disponibilidad de oxígeno, ya que en estructuras sumergidas, se pueden detectar potenciales muy negativos, sin que sean indicativos de corrosión (BRE, 2000).

En las zonas donde la armadura embebida en el hormigón presenta potenciales de media pila más negativos que -350mV, normalmente indica corrosión, sin embargo, se han encontrado potenciales muy negativos en hormigones saturados en agua, donde no hay oxígeno para iniciar o mantener la corrosión, (Song & Shayan, 1998).

La media pila o media celda, no siempre se debe a la corrosión que se produce en el momento de la medida, puede representar la química de la solución en contacto con el acero, que puede no estar relacionada con la corrosión, por lo tanto en la interpretación de potenciales de media pila o media celda, se deben considerar factores como el contenido de oxígeno y la concentración de cloruros, así como la resistencia eléctrica del hormigón, ya que tiene una influencia significativa en las lecturas. Elsener *et ál.*, (2003) presenta unos rangos de valores típicos del

potencial de corrosión del acero cuando el hormigón esta influenciado por diversas condiciones (Tabla 2.26)

Tabla 2.26. Valores típicos del potencial de corrosión del acero embebido en el hormigón (Elsener *et ál.*, 2003).

Condición de exposición del hormigón	Potencial E [mV vs. Cu/CuSO ₄]
Hormigón saturado de agua sin oxígeno	-900 ... -1000
Hormigón Mojado, contaminado por cloruros	-400 ... -600
Hormigón Húmedo, libre de cloruros	+100 ... -200
Hormigón húmedo, carbonatado	+100 ... -400
Hormigón seco, carbonatado	+200 ... 0
Hormigón seco	+200

Para aumentar la exactitud de las medidas, es conveniente disminuir la resistencia del hormigón mojando la superficie y posicionando el electrodo de referencia sobre el refuerzo.

2.9.1.2. Medida de la resistencia a la polarización lineal

La reacción anódica tiende a aumentar el potencial del acero, mientras que la reacción catódica tiende a disminuirlo, a este fenómeno se le llama polarización y refleja la dificultad para que estas reacciones se produzcan. Los resultados de la polarización de la armaduras, determinan la intensidad de corrosión, transformable en velocidad de pérdida de masa del metal a partir de la ley de Faraday de la electrolisis (ACI Committee 222, 2001):

$$M = \frac{A_w}{nF} It$$

Donde M es la masa de metal disuelto, A_w es la masa atómica del hierro, n la valencia, F la constante de Faraday (96500 culombios/masa equivalente), I la intensidad de corriente y t el tiempo.

Cuando se trata del acero, Bermúdez (2007) encuentra que dividiendo por la densidad, la masa se puede transformar en espesor de capa disuelto u oxidado a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 11,8 \mu\text{m}/\text{año}$ o $11,6 \mu\text{m}/\text{año}$ según Guzman, (2010). Así valores por encima de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ indican una velocidad de corrosión elevada (Guzman, 2010), aunque la corrosión puede considerarse como activa con densidades de corrosión superiores a $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Bermúdez M. , 2007).

Las medidas de velocidad de corrosión se interpretan a partir de experiencias previas en laboratorio. En la Tabla 2.27 se presentan algunos criterios propuestos para cualificar la corrosión según la intensidad de corrosión I_{corr} :

Tabla 2.27. Criterios propuestos para la evaluación de la corrosión a partir de la velocidad de corrosión.

Situación de corrosión	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
	Broomfield (1993,1994)	Clear (1989)	Andrade (1990)	BRE (2000)
Pasiva	< 0,1	< 0,2	< 0,2	< 0,1 a 0,2
Baja – Moderada	0,1 – 0,5	0,2 – 1	0,1 a 0,5	0,2 a 0,5
Moderada - Alta	0,5 – 1	1 – 10	0,5 a 1	0,5 a 1
Alto	> 1	> 10	>1	>1

Partiendo de los criterios mencionados, se han relacionado la intensidad de corrosión y el tiempo requerido para que se desarrolle la corrosión en la Tabla 2.28 se presentan los valores encontrados por Clear (1989).

Tabla 2.28. Tiempo para el desarrollo de la corrosión, según la velocidad de corrosión en el hormigón.

Tasa de Corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Tiempo para el desarrollo de la corrosión (años)
0,2 – 1	10 – 15
1 -10	2 -10
> 10	< 2

2.9.2 Relación entre el potencial eléctrico y el contenido en cloruros del hormigón

El potencial eléctrico ha sido tomado como un parámetro que implica todas las variables que pueden intervenir sobre el umbral de cloruros (Alonso *et ál.*, 2002) por lo que algunos investigadores relacionan valores de potencial con el contenido máximo en cloruros (Tabla 2.29).

Tabla 2.29. Datos de la bibliografía sobre el Potencial eléctrico y el umbral de cloruros en probetas de mortero y hormigón (Alonso *et ál.*, 2002).

Investigador	Elemento	Método de ensayo	Potencia de polarización E_p (SCE)	% Cl_{total}	% Cl_{libre}
Gouda (1970)	Hormigón	Galvanostático	-150, -200, -300	0.75, 1, 2	-
Andrade (1982)	Mortero	Galvanostático	-200 to -400	2	-
Hansson (1990)	Mortero	Potenciostático	+0	0.85, 1.07, 0.56, 1.05	-
Page (1991)	Hormigón	Medida del E_{corr}	-150 to -350	2.5	-
Breit (1995)	Mortero	Potenciostático	+260	0.25-1	0.12-0.65
Arup (1996)	Hormigón	Potenciostático	+200 to -250	1.7-2.7	-
Gutiérrez (1995)	Mortero	Potenciostático	+100, 0, -100, -150, -200, -300	-	1.04, 0.68, 1.16, 0.96, 1.36, 2.24
Alonso <i>et al.</i> (2002)	Hormigón	Potenciostático	$E > -200 \pm 50$	0.739 ± 0.025	0.50 ± 0.03

El rango de valores es amplio (Figura 2.37) debido a las variables que intervienen, entre ellas el tipo de cemento (contenido de C_3A), la muestra de ensayo y el método de ensayo son las mas significativas.

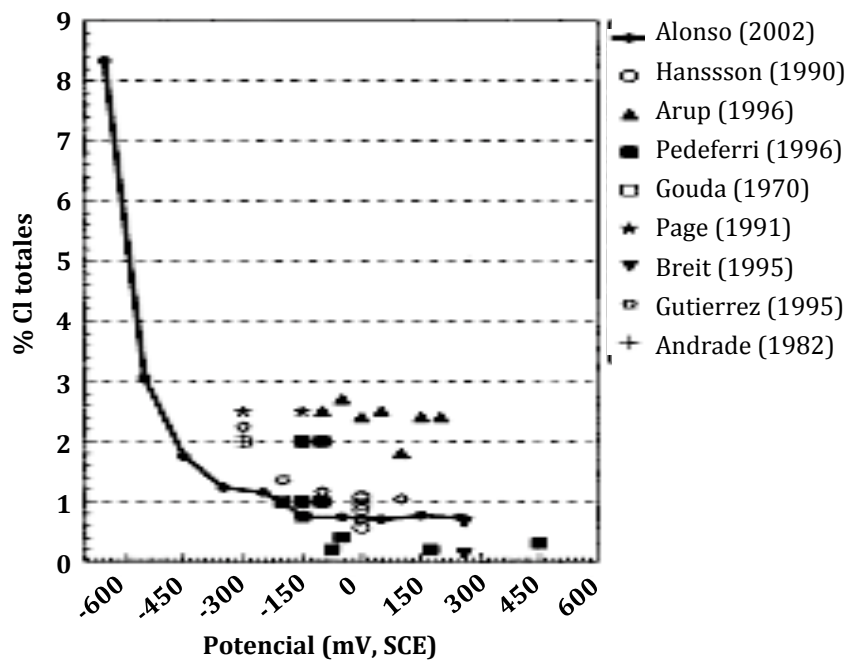


Figura 2.37. Valores encontrados en la bibliografía para el porcentaje de cloruros totales en función del potencial del acero de refuerzo (Alonso *et ál.*, 2002).

2.10 Conclusiones Estado del Arte

En la bibliografía es fácil encontrar que las propiedades del hormigón reciclado pueden verse afectadas por muchos factores y a distintos niveles respecto a un hormigón con áridos naturales. En general tenemos que las propiedades mecánicas ampliamente estudiadas en la bibliografía se ven disminuidas, no obstante, el hormigón con árido reciclado puede presentar las propiedades suficientes para aplicaciones en ingeniería civil.

Los áridos reciclados presentan gran heterogeneidad, debido a sus propiedades físico-químicas que dependen del tamaño máximo, procedencia y proceso de trituración de éste. Sin embargo es necesario realizar investigaciones con áridos disponibles en el mercado, como un paso para avalar su uso en la construcción garantizando el cumplimiento de los requisitos exigidos al material.

El árido reciclado tiene una mayor absorción debida al mortero adherido y hace que el hormigón sea más permeable, lo que genera problemas frente a la penetración de agentes agresivos y por lo tanto un mayor riesgo de corrosión sobre la armadura de refuerzo.

Algunos investigadores centran sus esfuerzos en el análisis del origen de los áridos, en el diseño de la mezcla, en el proceso de amasado o en la cantidad de árido reciclado que puede ser sustituida, pero todos coinciden en limitar el tamaño de árido reciclado a utilizar en hormigón para uso estructural ($> 4\text{mm}$), de manera que se garanticen unas propiedades mínimas del hormigón.

Según los resultados de la bibliografía estudiada, el uso de árido reciclado puede favorecer la reacción álcali-árido, por lo que se recomienda en el caso de ambientes agresivos, el uso de una única fuente controlada para su extracción además de un estudio complementario de la reactividad potencial, del árido reciclado y natural que se proyecten utilizar.

El establecimiento de criterios claros sobre la relación a/c en el hormigón con áridos reciclados es primordial para sus propiedades. En la bibliografía no siempre es fácil identificar si la relación a/c de la que se habla es referida al agua total (a_{tot}/c) o al agua efectiva (a_{ef}/c). De hecho la EHE, 2008 entra en controversia con

las recomendaciones internacionales al referirse al agua total para la relación a/c , pero conservando los mismo criterios, parámetros y límites que por ejemplo la norma EN-206-1,2002, que se rige por la relación a_{ef}/c , lo cual significa que la EHE es mucho más conservadora.

Definir el momento en los materiales son introducidos también es importante, las condiciones del árido reciclado deben garantizar las propiedades de trabajabilidad y resistencia del hormigón. Se encontró que los áridos son introducidos en condiciones de presaturado, para garantizar que no toman agua de la que se prevé se utilizara para que reaccione el cemento, sin embargo un adecuado proceso de presaturación, puede significar una barrera para una producción a nivel industrial.

La durabilidad del hormigón depende de la calidad de los materiales que lo componen, por lo tanto la calidad del árido reciclado es muy relevante y es necesario que cumpla con las recomendaciones y limitaciones prescritas de manera que no se vulnere la durabilidad del hormigón utilizado en ambientes agresivos como garantía de que el uso de áridos reciclados realmente contribuye al desarrollo sostenible.

Se han evaluado diferentes propiedades a lo largo del tiempo, sin embargo la evaluación de la durabilidad es un campo que requiere aún amplias investigaciones, debido a que la microestructura de los hormigones con árido reciclado resulta ser más compleja y cambia con el tiempo.

Algunos trabajos sobre hormigón con árido reciclado han estudiado el efecto de la corrosión, dentro del análisis de la durabilidad, sin embargo su evolución en el tiempo no está muy clara y la dispersión de los resultados presentados es tan amplia que no existe una tendencia claramente definida. Por un lado factores referidos al hormigón como el tipo de cemento, el tipo de árido, las condiciones de exposición y por otro el tipo de ensayo empleado, son variables que interfieren en los resultados.

La evaluación del coeficiente de difusión se convierte en un parámetro significativo para conocer la calidad del hormigón y por lo tanto su comportamiento frente a la penetración de cloruros para estimar su vida útil en un ambiente agresivo y por lo tanto su sensibilidad frente a la corrosión. En la bibliografía la mayoría de los

autores determinan este valor por métodos acelerados que no permiten determinar el coeficiente en estado no estacionario y se dan valores con gran dispersión para el coeficiente en estado estacionario.

La evaluación de la evolución de la corrosión en hormigones reciclados empieza a estudiarse en el último año con ensayos acelerados. Debe comprobarse los resultados obtenidos en este tipo de ensayos respecto a ambientes de difusión natural de cloruros en el hormigón y validar los resultados obtenidos por métodos de migración y difusión.

Se han desarrollado investigaciones de hormigón reciclado con adiciones minerales de distinta naturaleza y en diferentes cantidades, determinando en todos los casos que las propiedades del hormigón son mejoradas llegando a igualar o sobrepasar las de un hormigón con árido natural. lo cual sucede debido a que disminuye o desaparece la estructura porosa de la matriz, lo que genera una reducción de la permeabilidad y en general un mejoramiento de sus características mecánicas y de durabilidad.

Capítulo 3

Objetivos

A partir del estado del conocimiento se sabe que el árido reciclado tiene una alta absorción y porosidad en comparación con los áridos naturales y que estas propiedades suelen ser indicio de una menor calidad. Sin embargo, puede ser un material con un alto potencial de utilización a causa de la lógica tendencia a una construcción mas sostenible.

Esta tesis surge como una contribución al conocimiento y la investigación sobre la durabilidad de hormigones con árido reciclado en un ambiente marino, por lo que se han planteado los siguientes objetivos:

3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento del hormigón estructural con árido reciclado, respecto a su comportamiento mecánico y de durabilidad frente a un ambiente marino, analizando los mecanismos de transporte que permiten el ingreso y movimiento de los cloruros en el hormigón hasta la armadura.

Esta tesis tiene validez como aporte al conocimiento científico para la elaboración de recomendaciones que avalen el uso de este material.

3.2 Objetivos específicos

Ampliar los conocimientos para el uso del árido reciclado en hormigón estructural, como un material que surge para optimizar el uso de los recursos naturales y gestionar los residuos de construcción y demolición (RCD's), como contribución para cerrar el ciclo de la construcción.

Utilizar áridos reciclados disponibles en el mercado para el desarrollo experimental de este trabajo, de manera que los resultados de la investigación sean extrapolables a la realidad en la industria de la construcción, dada la heterogeneidad de los áridos reciclados según su origen y características de composición.

Evaluar la variabilidad del comportamiento mecánico en hormigones con áridos reciclados de hormigón de distinta fuente de procedencia pero con iguales especificaciones de partida: árido reciclado de hormigón ArH fracción 4/20mm, y determinar las propiedades más influyentes que generan diferencias en el producto final.

Analizar el efecto del estado de humedad de los áridos reciclados, previo al inicio de la mezcla, sobre la evolución de la resistencia a compresión del hormigón y el concepto más apropiado para la relación a/c (a_{ef}/c o a_{tot}/c).

Validar el uso de técnicas experimentales utilizadas en la evaluación de las propiedades del hormigón convencional para ser empleadas en hormigón con árido reciclado.

Estudiar la influencia de distintos porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso sobre las propiedades mecánicas del hormigón, determinando la resistencia a compresión, la resistencia a tracción indirecta y el módulo de elasticidad.

Estimar el comportamiento del hormigón con árido reciclado frente a la corrosión de armaduras en un ambiente marino artificial, simulando zonas continuamente sumergidas o en carrera de mareas (inmersión secado) para evaluar los ambientes de exposición IIIb y IIIc según EHE-08.

Analizar los mecanismos de transporte de agua y cloruros en el hormigón a distintas edades y con contenidos con árido reciclado entre 0% y 100%, para entender los procesos generados durante la fase de iniciación de la corrosión de armaduras por la penetración de cloruros en hormigones con árido reciclado y establecer las características que lo diferencian de un hormigón con árido natural.

Determinar el coeficiente de difusión de cloruros “D” como un parámetro de referencia en la calidad del hormigón según el contenido y el tipo de árido reciclado por medio de ensayos de migración comúnmente utilizados.

Comparar los resultados obtenidos para el coeficiente de difusión “D” en un ensayo de migración de cloruros frente un ensayo de difusión natural.

Validar la metodología de un ensayo no destructivo para el análisis de la corrosión determinando el potencial de corrosión E_{corr} y la intensidad de corrosión I_{corr} , mediante el uso del GECOR, para conocer como se presenta la actividad electroquímica en hormigones con árido reciclado, tomando como referencia un hormigón con árido natural.

Capítulo 4

Programa experimental

A partir de una continua búsqueda bibliográfica que recoge el estado del arte como base del conocimiento científico sobre el comportamiento de hormigones con áridos reciclados y su durabilidad, se planteó un desarrollo experimental para analizar la corrosión de armaduras por penetración de cloruros en el hormigón.

El procedimiento metodológico del programa experimental seguido para alcanzar los objetivos propuestos se presenta en la Figura 4.1.

La primera etapa, corresponde a los estudios previos necesarios para definir las características de los hormigones reciclados a analizar. Amasadas de prueba fueron realizadas para comprobar el procedimiento de fabricación, la trabajabilidad y la resistencia a compresión esperada.

Durante la fase dos, se llevaron a cabo los ensayos de caracterización de los hormigones, determinando sus propiedades físicas y mecánicas. Además se examinó la interfase que presenta su microestructura.

Finalmente, en la fase tres se evaluó la durabilidad del hormigón frente a la corrosión de armaduras en un ambiente marino para lo cual fueron analizados los mecanismos de transporte de agentes agresivos a través del hormigón, y concretamente la penetración de cloruros. El ingreso de los cloruros fue analizado

por difusión natural y migración determinando para los dos casos el coeficiente de difusión “D”.

En el análisis de difusión natural se obtuvo el perfil del contenido de cloruros a distintas profundidades sobre las probetas de hormigón armado expuestas al ambiente marino con agua de mar artificial tras más de un año de exposición. En los ensayos de migración se determinó el coeficiente de difusión “D” en estado estacionario y no estacionario a distintas edades para hormigones conservados en cámara húmeda (20°C y 100% humedad relativa) hasta el momento del ensayo.

Lecturas de potencial de corrosión E_{corr} e intensidad de corrosión I_{corr} fueron tomadas con el corrosímetro GECOR6, sobre probetas de hormigón armado expuestas a un ambiente marino a lo largo de la investigación.

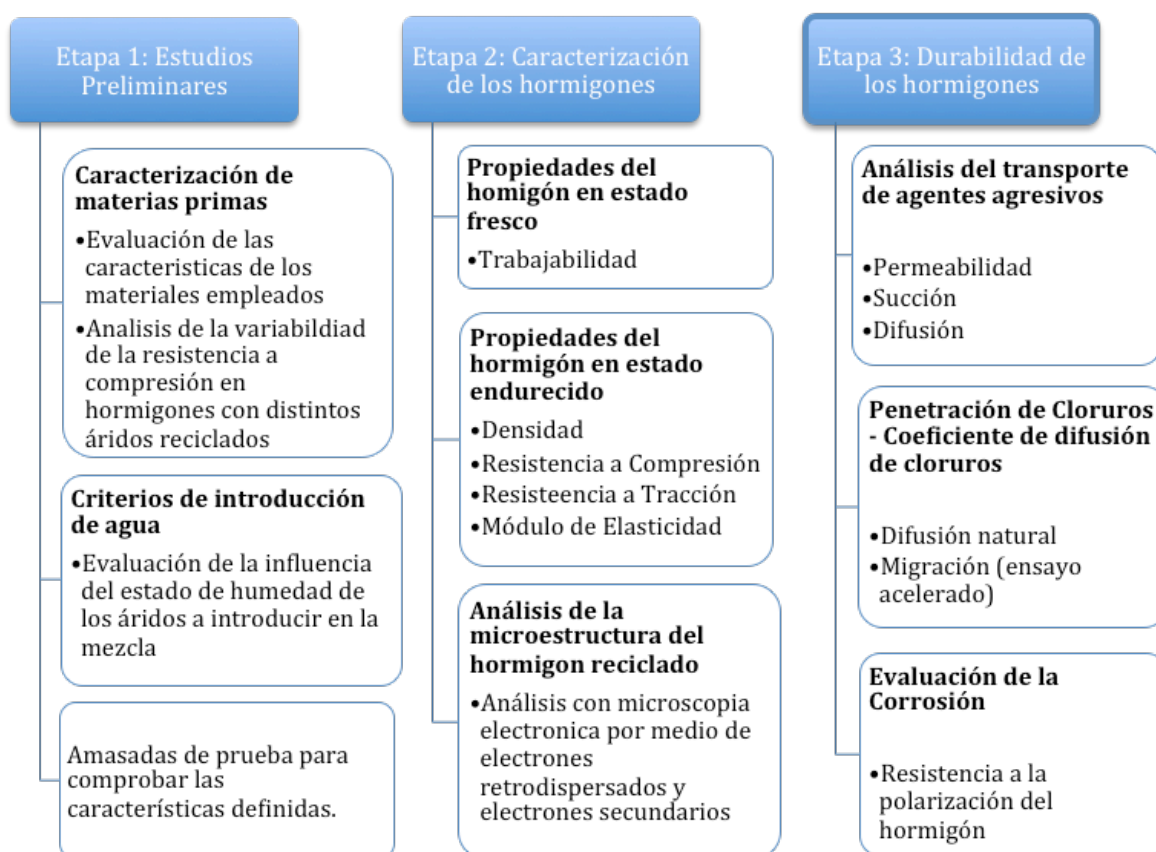


Figura 4.1. Diseño del programa experimental.

Hormigones con dos relaciones a/c, 0,45 y 0,50, con contenidos de cemento de 330 Kg/m³ y 380 Kg/m³ respectivamente fueron utilizados para evaluar el comportamiento frente a la durabilidad en ambiente de agua de mar intentando cumplir con las exigencias de la EHE para hormigones expuestos a un ambiente marino (tipo III, Según EHE-08). Debido a la mayor absorción de los áridos reciclados e intentando evaluar el caso más desfavorable, en este trabajo las relaciones a/c son consideradas con agua efectiva. Es decir, que el agua total en los hormigones será mayor, debido a la corrección por absorción correspondiente en la dosificación.

Únicamente la fracción gruesa de áridos naturales fue sustituida por distintos contenidos de árido reciclado de hormigón. Así hormigones con 20%, 50% y 100% de árido reciclado fueron comparados con un hormigón de referencia con árido natural, al que se designó como 0%.

La investigación sobre la corrosión de armaduras se llevo a cabo en probetas de hormigón con acero embebido, evaluando recubrimientos de 35mm y 50mm, cumpliendo así con las exigencias de la EHE (Ministerio de Fomento de España, 2008). Simulando los ambientes de exposición mediante inmersión continua y ciclos de inmersión/secado en piscinas de agua de mar artificial fabricada en el laboratorio.

Para el desarrollo de esta tesis doctoral fueron utilizadas 586 probetas cilíndricas de hormigón de 150x300mm y 32 probetas prismáticas de hormigón armado de 200x200x300mm. A continuación se describen con detalle las distintas etapas llevadas a cabo para la evaluación de la corrosión en un ambiente marino dentro del análisis de la durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado.

4.1 Estudios Preliminares: Selección y caracterización de materiales, determinación de las dosificaciones

En la Figura 4.2 se presenta un esquema de esta fase. Un cemento resistente al agua de mar es utilizado para el desarrollo experimental, enfocando el análisis en el comportamiento de los áridos.

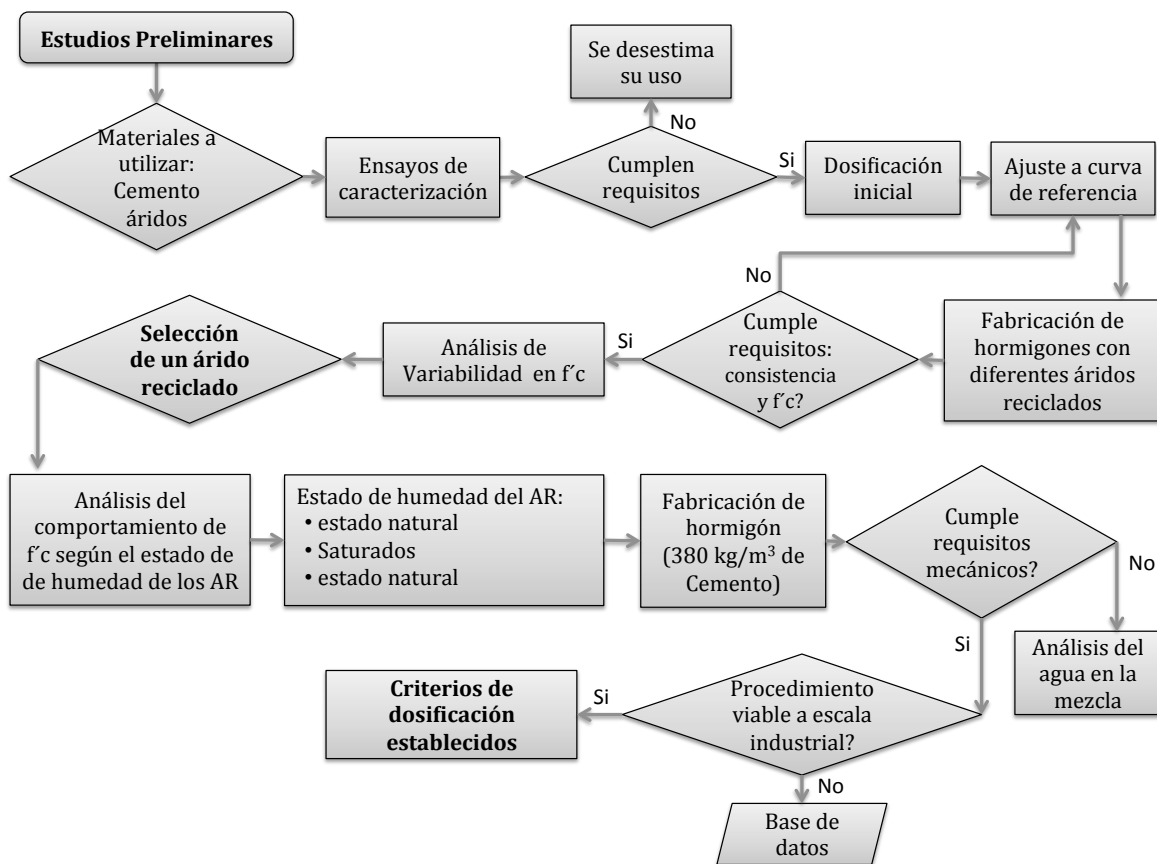


Figura 4.2. Esquema Etapa 1: Estudios preliminares: selección de un árido reciclado y su estado de humedad para la fabricación de los hormigones.

4.1.1 Selección y Caracterización de materias primas

Se evaluaron áridos reciclados de hormigón (ArH) procedentes de distintas plantas de gestión de residuos, ya que su heterogeneidad puede influir en las propiedades

estudiadas, tal como se presento en el estado del arte. Además un árido reciclado mixto de hormigón (ArM h) fue caracterizado, para ser empleado en la fase 3.

En la Tabla 4.1 se presentan los materiales utilizados en esta fase y su procedencia, aunque solo un árido reciclado fue seleccionado, para fabricar los hormigones a estudiar durante las siguientes etapas de esta investigación.

Tabla 4.1 Materiales

Cemento	CEM I 52.5 N/SR
Áridos naturales calizos machacados (Soinval)	Arena 0/4 mm Grava 7/12 mm Grava 12/20 mm
Áridos reciclados de hormigón ArH 4/20 mm	1 Madrid 2 Obra VLC 3 Moncofa 4 Benicarló 5 Murcia
Árido reciclado mixto de hormigón 4/20 mm	ArMh Moncofa

Sobre los áridos naturales y reciclados se realizaron por duplicado los ensayos de caracterización correspondientes. Para obtener las muestras representativas de todos los áridos se llevo a cabo un muestreo según las recomendaciones de la norma UNE-EN 932-1, 1997 y posteriormente se hizo la reducción de las muestras según los parámetros de la norma UNE-EN 932-2, 1999.

Sobre los áridos naturales y reciclados fueron realizados ensayos de granulometría (UNE EN 933-2:1996), densidad y absorción (UNE EN 1097-6:2001) y resistencia a la fragmentación (Coeficiente de Los Ángeles UNE EN 1097-2:2001). Adicionalmente, sobre los áridos reciclados se llevaron a cabo ensayos para determinar su composición (UNE EN 933-11:2009) y la cantidad de mortero adherido (Método de tratamiento térmico, apartado 2.1.4.1).

4.1.2 Influencia de la continuidad de calidad del árido reciclado en la resistencia a compresión del hormigón

Un análisis sobre la influencia en la continuidad de la calidad del árido reciclado de hormigón en la resistencia a compresión para hormigones con distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado fue llevado a cabo con el propósito de hacer extrapolables las conclusiones obtenidas. El hormigón con árido natural es tomado siempre como referencia.

Para el análisis de la variabilidad de resultados en resistencia a compresión, fueron utilizados los cinco áridos reciclados de hormigón (ArH) provenientes de diferentes plantas. Un estudio estadístico se llevó a cabo, con el fin de validar y dar pie al desarrollo de los siguientes apartados del programa experimental únicamente con un tipo de árido reciclado, con la idea de generalizar los resultados obtenidos.

Esta etapa que surge del proyecto (CLEAM, 2011), se llevó a cabo con dos relaciones a/c 0,45 y 0,55, empleando 385 y 325 Kg/m³ de cemento respectivamente y con los áridos reciclados presaturados (concepto E3 de las condiciones presentadas a continuación en 4.1.3. Tabla 4.3). Sustituciones de 0%, 20%, 50% y 100% de árido reciclado fueron analizadas.

En este apartado un total de 27 hormigones fueron producidos. Dos hormigones fabricados con árido natural (0%), uno para cada relación a_{R10}/c 0,45 y 0,55, fueron tomados como referencia. Con

Los 25 hormigones restantes fueron fabricados con árido reciclado en distintas proporciones. Algunas combinaciones no pudieron ser analizadas debido a la dificultad en la obtención de los áridos reciclados de hormigón ArH (fracción 4/20mm), ya que actualmente no son ampliamente producidos en las plantas a las que se tuvo acceso a causa de su baja demanda. Por ello en ocasiones solo se dispuso de pequeñas partidas. En la Tabla 4.2 se indica el número de probetas fabricadas para cada caso. El símbolo “-“ indica las situaciones no valoradas.

Tabla 4.2. Hormigones sobre los que se estudió la Influencia en la continuidad de la calidad del árido reciclado en la resistencia a compresión del hormigón (número de probetas fabricadas).

relación ar ₁₀ '/c	% sustitución	Áridos reciclados				
		1 Madrid	2 Obra VLC	3 Moncofa	4 Benicarló	5 Murcia
0,45	20%	6	6	6	-	-
	50%	6	6	6	6	6
	100%	6	6	6	6	6
0,55	20%	6	6	6	-	-
	50%	6	6	6	6	-
	100%	6	6	6	6	6

Para cada hormigón, se realizó una amasada de la que fueron obtenidas 6 probetas cilíndricas de 150x300mm, sobre las cuales se determinó la resistencia a compresión según la norma UNE-EN 12390-3, 2009 a 7 y 28 días. El análisis de este estudio es presentado en el apartado 6.2.1.

4.1.3 Evaluación de la influencia del estado de humedad de los áridos a introducir en la mezcla

Las propiedades del hormigón con árido reciclado se ven especialmente afectadas por el estado de humedad de los áridos reciclados y el procedimiento de fabricación del hormigón debido a sus características propias como la capacidad de absorción y el mortero adherido.

Seleccionado un tipo de árido reciclado se realizó un estudio sobre la influencia del estado de humedad de éste cuando es introducido en la mezcla. El agua fue introducida en la mezcla en distintos momentos, por lo que se utilizaron áridos en estado natural y presaturados.

Para esta sección, una dosificación base con porcentajes de sustitución de 0%, 20%, 50% y 100% de árido reciclado fue analizada para cuatro estados de humedad. A partir de los conceptos descritos en el apartado 2.2.3 sobre la relación

a/c se establece en este apartado la relación a/c nominal (a_n/c) que se fija en 0,45 para analizar los cuatro casos que se describen en la Tabla 4.3. La cantidad de cemento se fija en todos los casos en 380 Kg/m³ y la cantidad de agua nominal de partida en 171 Kg/m³.

Tabla 4.3. Descripción del estado de humedad del árido reciclado en cada caso, con la relación a/c en el hormigón.

Caso	Humedad en los áridos	Agua añadida	Agua total (a_{tot})	Agua efectiva (a_{ef})
E1	a_h	$171 - a_h$	171	$171 - a_{abs}$
E2	$a_{10'}$	171	$171 + a_{10'}$	$171 + a_{10'} - a_{abs}$
E3	$a_{R10'} + a_{Nh}$	171	$171 + a_{R10'} + a_{Nh}$	$171 + a_{R10'} - a_{abs}$
E4	a_h	$171 + a_{abs} - a_h$	$171 + a_{abs}$	171

a_h : agua de humedad que poseen todos los áridos
 a_{Nh} : agua de humedad que poseen los áridos naturales
 $a_{10'}$: agua que aportan los áridos tras 10 min sumergidos en agua y 10 min escurridos.
 $a_{R10'}$: agua que aportan los áridos reciclados tras 10 min sumergidos y 10 min escurridos.
 a_{abs} : agua que pueden absorber los áridos

El agua de humedad natural (a_h) de los áridos siempre se determina y según el estado en el que éstos se introducen (E1, E2, E3, E4) el agua añadida se corrige reduciendo el agua aportada por los áridos. Para el caso E2 y E3 no hay corrección del agua que aportan los áridos presaturados.

Así, para E1 la cantidad de agua total en el hormigón es el valor nominal 171 Kg/m³, mientras que para E4 este valor nominal de 171 Kg/m³ hace referencia a la cantidad de agua efectiva. En los estados E2 y E3 donde previamente se realiza un proceso de presaturación, el agua nominal (171 Kg/m³) es adicionada durante el proceso de mezcla, la diferencia entre éstos radica en que para E2 todos los áridos gruesos son presaturados, mientras que para E3 solo los áridos reciclados son sometidos a este procedimiento.

Se analiza el efecto relativo de la capacidad de absorción de los áridos y del agua absorbida en función del procedimiento en que se incorporaron a la mezcla de hormigón (como agua añadida o como presaturación del árido).

Un total de 16 hormigones fueron fabricados en este apartado, donde para cada uno de ellos se determinó la resistencia a compresión a 28 días según la norma (UNE-EN 12390-3, 2009), sobre 4 probetas cilíndricas de 150x300mm. El análisis de este estudio se presenta en el capítulo 6.3.

Finalizada la etapa de estudios previos, se decidió desarrollar los siguientes apartados de esta investigación con los áridos introducidos en estado natural y tomando la relación a_{ef}/c como referencia, contabilizando en el agua a añadir en la mezcla, la corrección por humedad y absorción de los áridos.

4.2 Caracterización de los hormigones: determinación de las propiedades físico-mecánicas

En este apartado y en el resto del estudio los hormigones se fabricaron introduciendo los áridos en la mezcla según E4. Así, la relación a_{ef}/c en todos los hormigones fue fijada. Se fabricaron y caracterizaron frente a propiedades mecánicas, los ocho hormigones que posteriormente se utilizaron en el estudio de la durabilidad y sobre los que se evaluó la corrosión en ambiente marino:

- ✓ Se utilizó un árido reciclado: árido reciclado de hormigón ArH (1-Madrid)
- ✓ Todos los áridos son introducidos en estado natural
- ✓ Relaciones a_{ef}/c 0,45 y 0,50
- ✓ Porcentajes de sustitución de árido reciclado: 0%, 20%, 50% y 100%

Para la caracterización de los hormigones fueron analizadas las propiedades físicas y mecánicas, tanto en estado fresco como en estado endurecido:

- en estado fresco: ✓ Asentamiento (UNE-EN 12350-2, 2009)
- en estado endurecido: ✓ Densidad (UNE-EN 12390-7, 2009)
 ✓ Resistencia a Compresión (UNE-EN 12390-3, 2009)
 ✓ Resistencia a tracción indirecta (UNE-EN 12390-6, 2010)
 ✓ Módulo de elasticidad (UNE 83316, 1996)

La determinación de todas las propiedades del hormigón endurecido se realizó a la edad de 28 días tomando como valor la media del resultado de 3 probetas. Para el caso de la resistencia a compresión se realizaron también ensayos a 90, 180, 360 días.

Distintas amasadas de 50 lt fueron realizadas para obtener las probetas necesarias y analizar las propiedades físico-mecánicas. Como parámetro de control para todas las amasadas se determinó la resistencia a compresión. Las probetas utilizadas para el ensayo de resistencia a compresión y módulo de elasticidad fueron previamente pesadas y medidas para determinar la densidad. En la Tabla 4.4 se presenta una relación de las probetas realizadas.

Tabla 4.4.Hormigones y número de probetas sobre los que se evalúan propiedades mecánicas.

relación a_{ef}/c	% sust	Propiedades físico-mecánicas		
		Resistencia a Compresión	Resistencia a tracción indirecta	Módulo de elasticidad
0,45	0%	18	3	3
	20%	18	3	3
	50%	18	3	3
	100%	18	3	3
0,50	0%	18	3	3
	20%	18	3	3
	50%	18	3	3
	100%	18	3	3

También una inspección sobre la microestructura de hormigones con árido reciclado es realizada con el fin de conocer las reacciones que se producen en la matriz del hormigón, intentando entender el fenómeno de la zona de transición o interface del árido reciclado con la pasta de hormigón. Un análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) sobre hormigones con 100% de árido reciclado se realizó a 28 días de edad. Un total de 20 muestras (trozos o secciones de hormigón) fueron analizadas. Entre ellas, Dos corresponden a hormigón con árido natural y las dieciocho muestras restantes a hormigón con árido reciclado. Las muestras de trozos de hormigón fueron tomadas para la evaluación morfológica de la estructura y muestras de hormigón embebidas en resina epóxica y pulidas para el análisis de EDS, gracias a un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) que permite percibir los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas.

4.3 Durabilidad de los hormigones con árido reciclado: evaluación del comportamiento en un ambiente marino

Para analizar la durabilidad del hormigón es esencial evaluar las propiedades que controlan los mecanismos de transporte de agentes agresivos hacia el interior del hormigón y por lo tanto hacia la armadura. Así, la permeabilidad, la succión capilar y la difusión fueron analizadas en esta etapa. La difusión de cloruros se analizó de dos maneras, por medio del contenido de cloruros en el hormigón a diferentes profundidades y mediante un ensayo acelerado de migración, para evaluar el coeficiente de difusión D.

La determinación del coeficiente de difusión D, de los iones cloruro a través del hormigón, requiere en muchas ocasiones de la aplicación de campos eléctricos con el fin de obtener resultados en plazos razonables de tiempo. Sin embargo, esta aceleración del transporte podría modificar las complejas interacciones que tienen lugar entre los iones cloruro y la matriz de cemento, haciendo que los coeficientes obtenidos mediante ensayos de migración no sean representativos de condiciones

de difusión natural. Por ello fueron evaluadas las dos situaciones, mediante la realización tanto de ensayos de migración de cloruros en estado estacionario y no estacionario (UNE 83987, 2009), como de difusión natural de cloruros, por medio de la evaluación del contenido de cloruros (UNE-EN-14629, 2007) (estado no estacionario). En este último caso la valoración del coeficiente de difusión de cloruros a partir del contenido de cloruro fue llevada a cabo con un modelo desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid, como parte de la Tesis doctoral (en proceso de terminación) de Michiel Fenaux. *Modelling of chloride ion penetration into hardened concrete taking into account the microscopic properties of the material* (2012).

Finalmente el potencial y la intensidad de corrosión fueron evaluados en probetas de hormigón armado en condición de inmersión continua e inmersión-secado, con el fin de validar la efectividad de los recubrimientos prescritos por la Instrucción EHE-08 (35mm y 50mm) para la protección de armaduras en hormigones con distintos porcentajes de árido reciclado (0%, 20%, 50% y 100%) y con relaciones a_{ef}/c de 0,45 y 0,50, sometidos a un ambiente de agua de mar preparada en laboratorio. Un esquema representativo de esta etapa se presenta en la Figura 4.3.

Sobre los ocho hormigones caracterizados en la fase anterior se determinaron las siguientes propiedades de durabilidad a distintas edades de curado:

- Porosidad (ASTM-C642, 2006) 28, 90, 180, 365 días
- Penetración de agua bajo presión (UNE EN 12390-8: 2009) 28, 180, 365 días
- Succión capilar (UNE-83982, 2008) 28, 90 días
- Penetración de Cloruros (Migración)- (UNE 83987, 2009) 7, 30 y 365 días
- Evolución de la Corrosión a lo largo de 15 meses

Las probetas para el ensayo de penetración de cloruros fueron puestas a la edad de 30 días, debido a que no fue posible poner a punto las celdas de difusión con las muestras correspondientes para la edad de 28 días, sin embargo se considera la evaluación de la penetración de cloruros en el mismo plazo de tiempo (medio) a efectos del análisis de los datos.

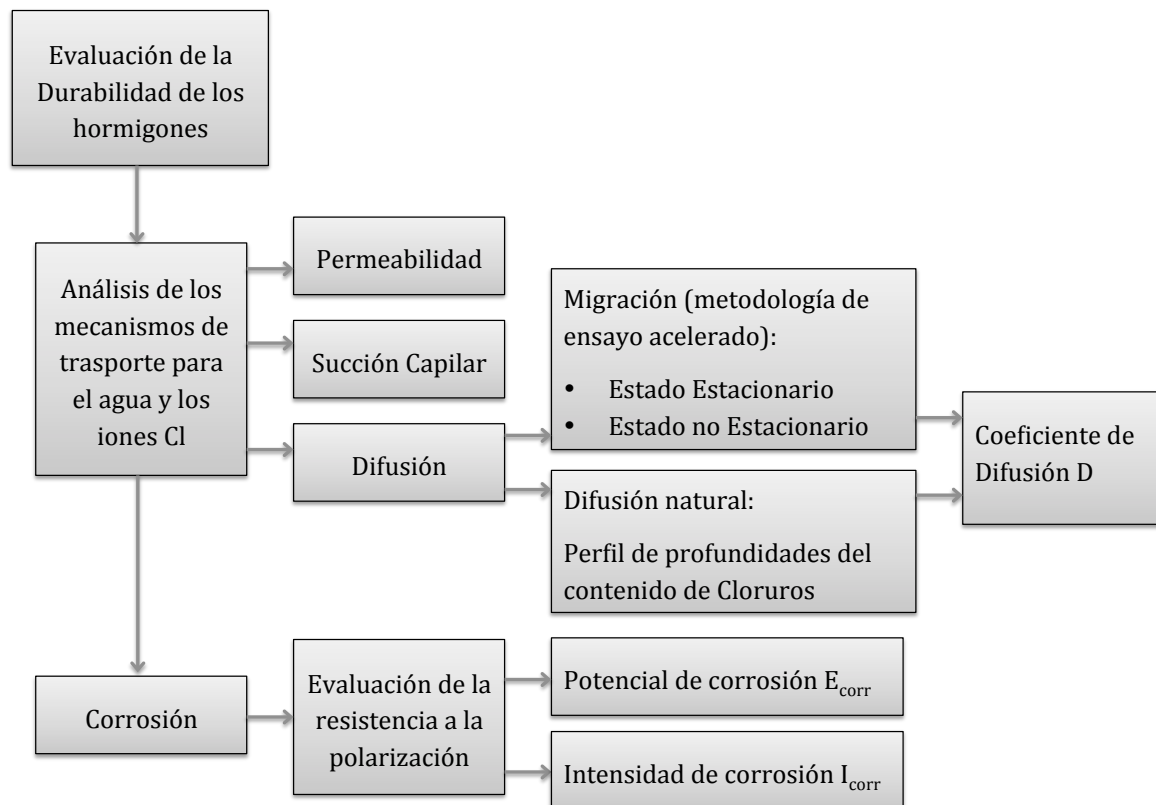


Figura 4.3 Etapa 3: Evaluación y Análisis de las propiedades de durabilidad del hormigón con áridos reciclados sometido a un ambiente marino.

Además sobre las probetas de hormigón armado sometidas a la acción del agua de mar durante 15 meses, se ha evaluó:

- ✓ Corrosión – Mediciones durante 15 meses sobre los hormigones expuestos al ambiente marino (ASTM-C876, 2009).
- ✓ Contenido en cloruros – Difusión natural tras más de un año de exposición al ambiente marino (UNE-EN-14629, 2007).

En la Tabla 4.5 se relaciona el numero de probetas cilíndricas o prismáticas utilizadas para analizar cada propiedad. Para los ensayos de permeabilidad, porosidad, succión capilar y coeficiente de migración fueron utilizadas probetas cilíndricas de 150x300mm, de las que se hicieron cortes o se extrajeron testigos según el caso. Para la evaluación de la corrosión se utilizan probetas prismáticas de 30x20x20 descritas en el apartado 4.3.3 de este capítulo.

Tabla 4.5. Hormigones y número de probetas sobre los que se analizan las propiedades de durabilidad.

relación a_{ef}/c	% sust	Propiedades de durabilidad					Corrosión
		Porosidad	Permeabilidad	Succión Capilar	Cof. D Migración	Cof. D Difusión	
ArH 0,40	0%				2		
	100%				2		
ArH 0,45	0%	8	6	3		X	5
	20%	8	6	3			3
	50%	8	6	3			3
	100%	8	6	3	1	X	5
ArH 0,50	0%	8	6	3	3	X	5
	20%	8	6	3			3
	50%	8	6	3	1		3
	100%	8	6	3	3	X	5
ArH 0,60	100%		2		1	X	2
ArMh 0,35	100%				1		
ArMh 0,40	100%				1		
ArMh 0,50	100%				2		

4.3.1 Análisis de la migración de Cloruros en hormigón con áridos reciclados de RCD

Para el análisis del coeficiente de difusión de cloruros D, mediante el ensayo de migración bajo los parámetros de la norma UNE 83987, 2009 se consideraron tres edades de curado (7, 30 y 365 días), para las que se evaluaron hormigones con relación a_{ef}/c 0,40 y 0,50 utilizados a lo largo del desarrollo de este trabajo. Además dos hormigones con relaciones a_{ef}/c 0,35 y 0,60, se analizaron a 30 días para confirmar las tendencias y con este propósito se planteo únicamente en esta sección un programa experimental (Tabla 4.6), donde se ha examinado además del comportamiento de hormigones con árido reciclado de hormigón (ArH), el

comportamiento del hormigón con un árido reciclado procedente de Residuos de Construcción y demolición (RCD's), de menor calidad, clasificado según la GEAR (GEAR project, 2011) como árido reciclado mixto de hormigón (ArMH), disponible fácilmente en el mercado de los áridos reciclados de RCD's, buscando valorar una situación más desfavorable. Ensayos de resistencia a compresión se realizaron para caracterizar siempre todos los hormigones.

Se estudiaron en este apartado, hormigones con 0% y 100% de árido reciclado. Únicamente un hormigón con 50% de árido reciclado fue analizado a largo plazo. Por otro lado el árido natural tomado como referencia fue el mismo en todo el programa. En todos los casos fueron ensayadas 3 muestras por cada hormigón.

Tabla 4.6. Programa experimental para la evaluación de la penetración de Cloruros.

Edad	Corto plazo (7 días)			Medio plazo (30 días)			Largo plazo (más de 365 días)		
	Árido a _{ef} /c	AN 0%	ArH 100%	ArMh 100%	AN 0%	ArH 100%	ArMh 100%	AN 0%	ArH 50% 100%
0,35							X		
0,40	X	X	X	X	X				
0,45									X
0,50	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,60					X				

En los ensayos de migración se aplicó un campo eléctrico de 12V para acelerar el proceso siguiendo la norma UNE 83987, 2009, sobre testigos obtenidos de probetas de hormigón conservadas en cámara húmeda a distintas edades, el procedimiento seguido en el ensayo se describe con detalle en el apartado 5.3.4.1.

Además se analizó la influencia de la edad del hormigón en la penetración de cloruros al ser sometido al ataque. El coeficiente de difusión de cloruros en estado estacionario y no estacionario, se determinó a corto (7 días) y medio plazo (30 días) para hormigones con dos tipos de árido reciclado (ArH y ArMH). Mientras que

a largo plazo (1 año), el coeficiente de difusión de cloruros se evaluó solo para hormigones con árido reciclado de hormigón (ArH).

4.3.2 Análisis de la difusión natural de cloruros en hormigón con áridos reciclados, expuestos a un ambiente marino

La difusión natural se evaluó por medio del perfil de concentración de cloruros en probetas de hormigón armado tras más de un año de exposición a un ambiente marino de agua de mar artificial, en estado de inmersión continua y ciclos de inmersión secado, sobre las que se extrajo una muestra a distintas profundidades, entre 0-10mm, 10-20mm, 20-30mm, 30-40mm, 40-50mm y finalmente entre 50-60mm. Un total de 9 hormigones fueron evaluados (Tabla 4.7), por lo tanto 45 muestras fueron extraídas sobre cada una de las cuales se realizaron 3 valoraciones del contenido de cloruros, según la norma UNE-EN-14629, 2007 como se describe en el apartado 5.3.4.2 de técnicas experimentales. Se valoró la concentración de cloruros sobre hormigones con porcentajes de sustitución 0% y 100% de árido reciclado de hormigón (ArH), y con relación a_{ef}/c de 0,45, 0,50 y 0,60.

El perfil de concentración de cloruros (% de cloruros totales respecto al hormigón) fue obtenido y finalmente se calculó el coeficiente de difusión de cloruros D y la concentración superficial C_s .

Tabla 4.7. Hormigones sometidos a la evaluación del contenido de cloruros.

a_{ef}/c	Ambiente marino	0%	20%	50%	100%
0,45	Inmersión Continua	X			X
0,45	Inmersión/Secado	X			X
0,5	Inmersión Continua	X			X
0,5	Inmersión/Secado	X			X
0,6	Inmersión/Secado				X

4.3.3 Evaluación de la corrosión en hormigones con árido reciclado

Se analizó la corrosión de armaduras en el hormigón con árido reciclado (ArH) sobre probetas expuestas a un ambiente de agua de mar artificial, mediante el uso del corrosímetro GECOR, un equipo que por medio de un método de polarización lineal determina la intensidad y el potencial de corrosión, El agua de mar fue fabricada en el laboratorio y su composición se presenta en la Tabla 4.8. La mayoría de las aguas de mar presentan una composición química uniforme, caracterizada por la presencia de un 3.5% de sales solubles en peso y su pH varía entre 7.5 y 8.4 (Mehta P. K., 1986).

Tabla 4.8. Composición del agua de mar fabricada en el laboratorio (ASTM-D1141, 2008)

Componente	Concentración (g/l)
NaCl	24.72
KCl	0.67
CaCl ₂ ·2H ₂ O	1.36
MgCl ₂ ·6H ₂ O	4.66
MgSO ₄ ·7H ₂ O	6.29
NaHCO ₃	0.18

Para el desarrollo de esta investigación se prepararon dos tanques con agua de mar artificial, donde fueron dispuestas las probetas sometidas al ambiente marino bajo diferentes condiciones:

- ✓ Inmersión Continua (simulando ambiente IIIb, según EHE)
- ✓ Inmersión/Secado -7 días Inmersión/7 días secado- (simulando ambiente IIIc, según EHE)
- ✓ Sin ataque (Cámara húmeda 20°C y 95% HR)

El diseño de las probetas (Figura 4.4) se ha realizado cumpliendo las especificaciones y parámetros de durabilidad señalados por la EHE (Ministerio de Fomento de España, 2008), para hormigones sometidos a la acción del agua de mar. Dos valores de recubrimiento: 35mm y 50mm fueron evaluados, disponiendo dos barras de acero de 12mm para cada uno. Cada probeta contiene un total de 4

barras, separadas por lo menos 100 mm entre si, con el fin de poder tomar las lecturas con el GECOR, sin interferencias.

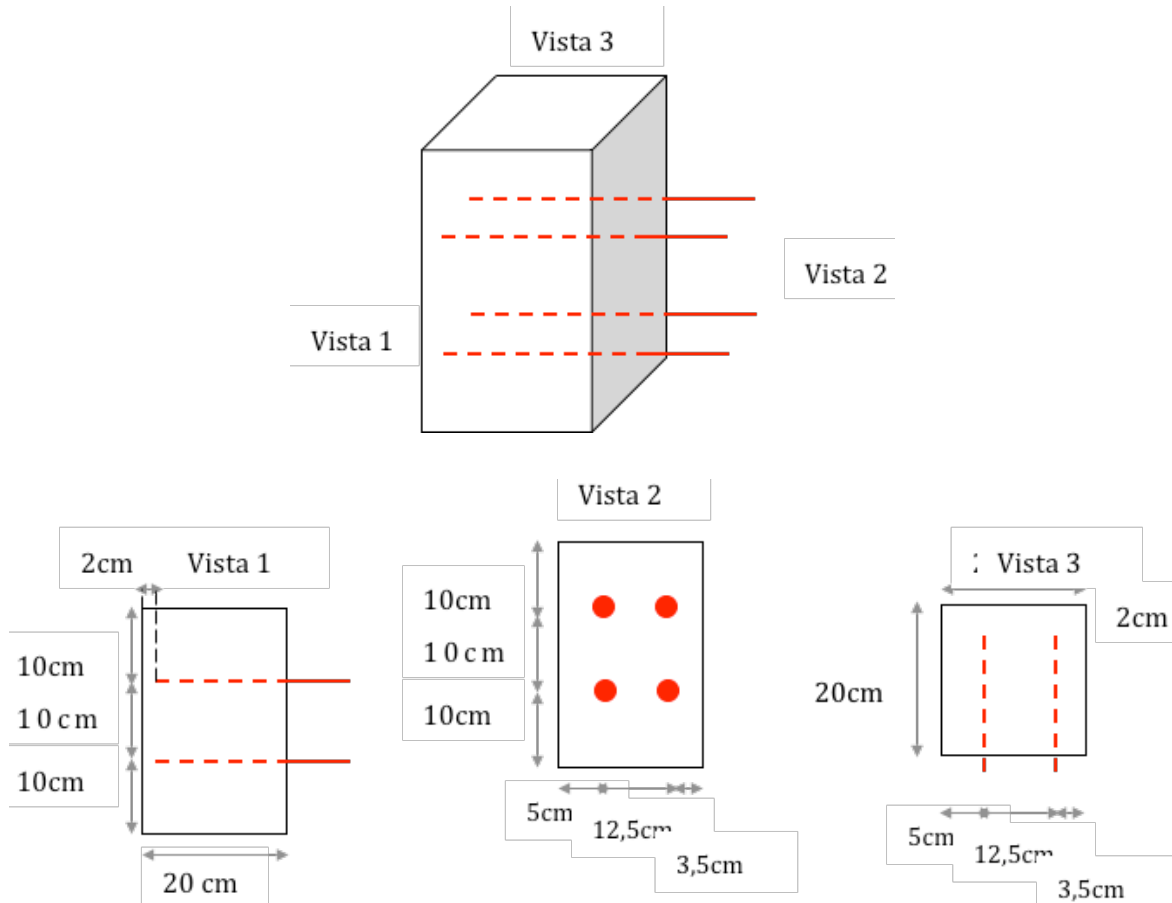


Figura 4.4 Diseño de probetas para la evaluación del potencial de corrosión con medidas en cm.

Durante quince meses se tomaron lecturas de potencial e intensidad de corrosión sobre probetas sometidas a un ambiente marino. Se controló periódicamente el contenido en componentes de la solución y se dispusieron las probetas para las condiciones determinadas. Así, de las 32 probetas de hormigón armado fabricadas, 12 fueron sometidas a ciclos de inmersión secado, 12 mantenidas en condiciones de inmersión continua y 8 se conservaron en la cámara húmeda.

Capítulo 5

Técnicas experimentales

En el desarrollo de esta tesis doctoral se utilizaron diversas técnicas experimentales con el propósito de obtener unos resultados fiables sobre las propiedades de los hormigones estudiados. En este capítulo se citan las técnicas utilizadas con referencia a las normas de ensayo empleadas, y se acompaña de documentación gráfica complementaria, así como los detalles específicos de los aspectos que no siguen procedimientos habituales o normalizados.

5.1 Caracterización de áridos

Para obtener muestras representativas de todos los áridos se llevó a cabo un muestreo previo, siguiendo las recomendaciones de la norma (UNE-EN 932-1, 1996), y posteriormente se hizo la reducción de las muestras en laboratorio, según los parámetros de la norma (UNE-EN 932-2, 1999) utilizando normalmente el método de división en 5/8, con la ayuda del divisor de muestras (Figura 5.1).



Figura 5.1. Toma y reducción de muestras

5.1.1 Densidad y absorción

Para determinar la densidad y absorción de los áridos naturales y reciclados se siguió el procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE EN 1097-6 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de las partículas y la absorción de agua, utilizando el método del picnómetro para todas las fracciones. En la Figura 5.2 (a y b) se presentan detalles del ensayo de densidad para la fracción fina y en (c y d) aspectos correspondiente a la fracción gruesa.

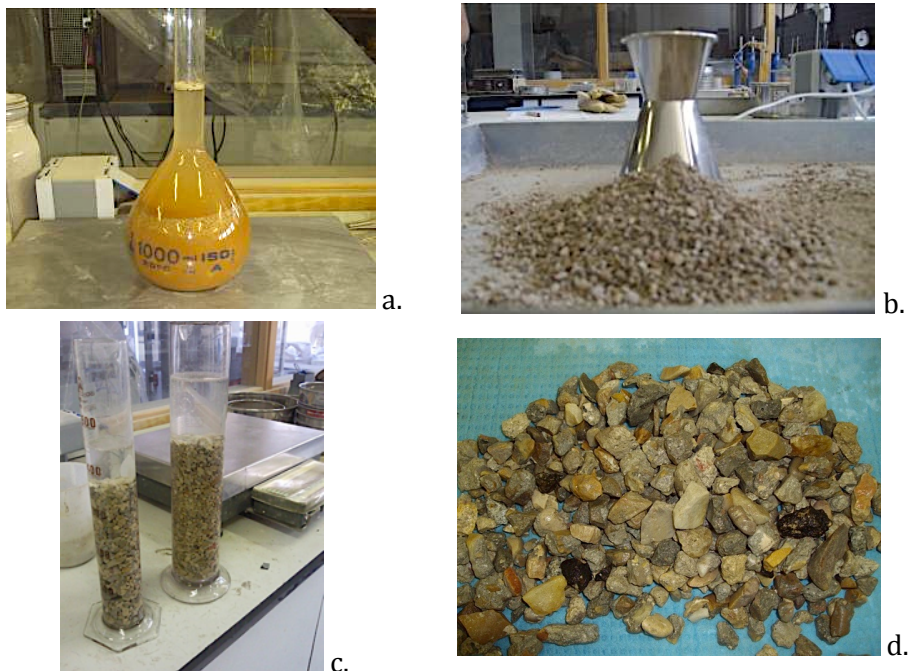


Figura 5.2. Ensayo de Densidad a) Método del Picnómetro fracción 0,063/4mm. b) Prueba del cono para obtener el peso saturado superficie seca de la fracción fina. c) Método del picnómetro fracción 4/31,5mm. d) Muestra en condición saturada superficie seca.

5.1.2 Granulometría

La norma UNE EN 933-1 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas, es utilizada con la serie de tamices que establece la norma UNE EN 933-2. En la Figura 5.3 se presenta la serie de tamices utilizados, y un detalle de las fracciones tamizadas fina y gruesa.

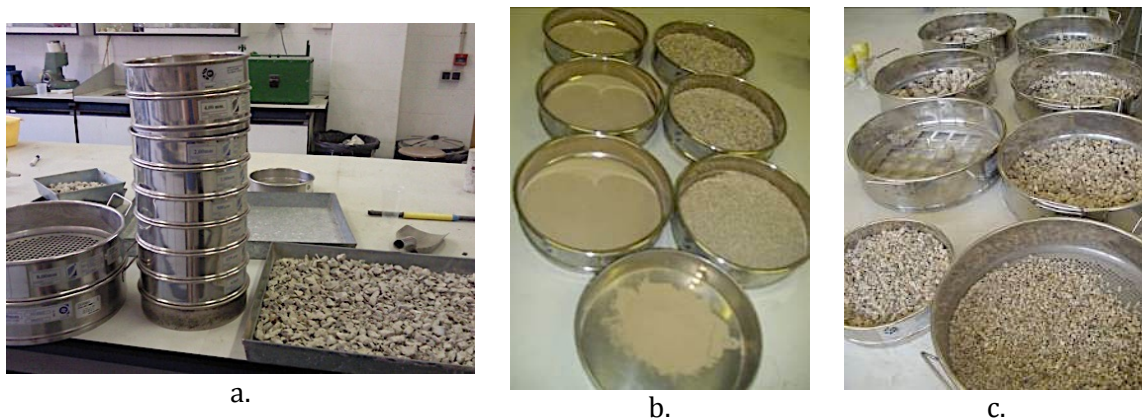


Figura 5.3. Caracterización granulométrica de los áridos. a) serie de tamices utilizados. b) Tamices con las muestras retenidas para la fracción fina. c) Tamices con la fracción gruesa.

5.1.3 Resistencia a la fragmentación

Se utilizó el ensayo normalizado en UNE-EN 1097-2:1999 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación, por el método de ensayo de los ángulos para los áridos reciclados 4/20mm y la grava natural 12/20mm (Figura 5.4).



Figura 5.4. Equipo para el ensayo de Los Ángeles.

5.1.4 Composición

La caracterización por composición se realiza únicamente para los áridos reciclados, bajo los parámetros de la norma UNE EN 933-11 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. El propósito es conocer la proporción de los distintos componentes que pueden estar presentes en el árido reciclado hormigón, materiales de albañilería, asfalto, vidrio, madera, etc. (Figura 5.5).



Figura 5.5. Separación de los componentes del árido reciclado (áridos naturales y hormigón, asfalto, materiales de albañilería, papel, madera, vidrio).

5.1.5 Mortero adherido

Esta técnica de caracterización es utilizada únicamente para los áridos reciclados, no existe aún ningún procedimiento normalizado. Los métodos encontrados en la bibliografía para determinar la cantidad de mortero adherido son presentados en el capítulo 2:

- Tratamiento con ácido clorhídrico,
- Fabricación de hormigón con una matriz de cemento de color diferente (Análisis de imágenes)
- Hielo- deshielo
- Método de choque térmico.

Para el desarrollo de esta tesis doctoral se ha utilizado el método de choque térmico (Barra M., 1996), ya que es aplicable a cualquier tipo de árido reciclado y es considerado efectivo y fácil de realizar (Butler *et ál.*, 2011). Además existen resultados de otros investigadores que han utilizado este método con áridos reciclados producidos en España (Pelufo *et ál.*, 2009; Sánchez & Alaejos, 2009), lo que puede permitir tener parámetros de referencia. En este método el árido es sometido a cambios bruscos de temperatura, para producir una separación del mortero adherido de tipo físico.

Para el ensayo se pasa la muestra por los tamices de 16, 8 y 4 mm, para obtener dos fracciones (4/8 y 8/16). De ellas se separan las partículas distintas de árido de hormigón, es decir, ladrillo, asfalto, terrones, plásticos, madera, etc. y se pesa el resto de la muestra (m_i).

Se saturara el mortero que queda adherido a los áridos, dejando la muestra durante dos horas en agua a 10°C y luego se somete a un calentamiento en mufla a 500°C durante dos horas más (Figura 5.6).



Figura 5.6. Procedimiento de choque térmico en los áridos reciclados.

Desde la mufla, inmediatamente, se sumerge nuevamente en agua fría. El cambio brusco de temperatura provoca unas tensiones en el mortero que producen su disgregación y facilitan su separación mediante el uso de un martillo de goma.

Finalmente se lavan los áridos pasándolos por el tamiz de 4 mm, obteniendo los áridos sin mortero adherido (Figura 5.7). Se secan, se pesan (m_f) y se calcula la cantidad de mortero adherido, como el porcentaje de peso que se ha perdido en la muestra.

$$\% \text{ mortero adherido} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$



Figura 5.7. Detalles del ensayo. a) Fracciones utilizadas. b) Áridos sometidos a machaqueo para desprender el mortero adherido.

5.2 Fabricación de hormigones y probetas

Para la fabricación de todos los hormigones a lo largo del desarrollo de esta tesis doctoral se ha seguido el procedimiento descrito en la norma (ASTM-C192, 2007). Detalles del procedimiento de amasado pueden observarse en las Figura 5.8 a Figura 5.13. El agua de amasado es añadida en dos etapas, así $\frac{1}{3}$ es añadida con los áridos gruesos y el resto después de introducir la arena y el cemento, reservando solo un poco para añadirla con el aditivo al final del proceso.



Figura 5.8. Se preparan las materias primas y los materiales a emplear (probetas, cronometro, termómetro, cono, etc.)



Figura 5.9. Se humedece el tambor de la hormigonera, se añaden los áridos gruesos (de mayor a menor tamaño) y se incorpora $\frac{1}{3}$ el agua. 2 vueltas a la hormigonera para extender los áridos y esperar 30 seg.



Figura 5.10. Se introducen el árido fino y cemento, se pone la hormigonera en marcha y se añade el agua reservando una pequeña cantidad de agua para mezclar con el aditivo. Se amasa durante 2 minutos.



Figura 5.11. Se deja en reposo 2 minutos, se añade el aditivo disuelto en el agua restante y finalmente 2 minutos mezclando.



Figura 5.12. Se mide la temperatura del hormigón, se hace el cono para evaluar la consistencia del hormigón (consistencia blanda, entre 60-90mm) y si es adecuado se fabrican las probetas.



Figura 5.13. Las probetas se mantienen 24h cubiertas, luego son retiradas de los moldes, marcadas y almacenadas en la cámara húmeda.

Para la sección de estudios previos, en la evaluación del estado de humedad de los áridos reciclados y el agua en la mezcla, definidos en el apartado 4.1.3. tabla 4.3. se fabrican los hormigones con el mismo procedimiento de amasado descrito anteriormente, aunque en el caso de utilizar áridos presaturados se realiza un proceso previo para la presaturación (caso E2 y E3 Figura 5.14). Los áridos requeridos para la amasada son pesados en estado natural y posteriormente introducidos en el agua. Pasados 10 min son retirados del agua y se dejan escurrir entre 10 y 15 min. Se vuelven a pesar para conocer la cantidad de agua que poseen y se introducen en la amasadora para continuar con el procedimiento descrito (Figura 5.10).

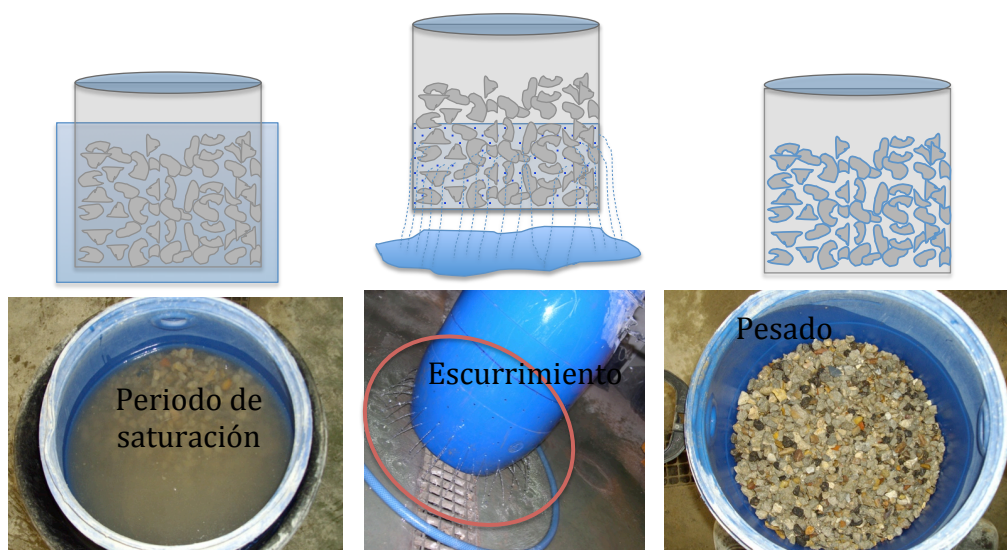


Figura 5.14. Detalle de la preparación de los áridos reciclados para ser introducidos en el hormigón según el caso de estudio. Áridos presaturados E2 y E3.

5.3 Caracterización físico-mecánica de Hormigones.

5.3.1 Asentamiento

Para medir la trabajabilidad del hormigón se ha utilizado en método del cono de Abrams (Figura 5.15) según la norma UNE-EN 12350-2:2009 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.



Figura 5.15. Ensayo de asentamiento con los hormigones estudiados.

Para todos los hormigones se buscó un valor de asentamiento de entre 6 y 9 cm, consistencia blanda (B) por lo que se hicieron los ajustes correspondientes de la cantidad de aditivo mediante amasadas de prueba.

5.3.2 Densidad

Se determina la densidad sobre probetas de hormigón, según la norma UNE-EN 12390-7:2009 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido. Esta norma describe la metodología para determinar la densidad del hormigón endurecido en estado saturado en agua, secado en estufa o en condiciones de recepción. En este trabajo se presenta la densidad sobre probetas de hormigón de 150x300 mm medidas y pesadas en el momento previo a cada ensayo. El volumen fue obtenido usando las medidas reales, tomadas de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-1.

5.3.3 Resistencia a Compresión

Para la evaluación de la resistencia a compresión de los hormigones estudiados, se han utilizado probetas cilíndricas de 150x300 mm, curadas en cámara húmeda a 20°C de temperatura y 100% de humedad relativa, hasta el momento del ensayo siguiendo los parámetros de la norma UNE EN 12390-3 de 2009 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

Se utiliza una prensa servocontrolada Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W de 3000 kN con marco de ensayos de alta rigidez, de 4 columnas y rótula autoblocante, con sistema de control por ordenador de Ibertest (Figura 5.16). Esta prensa se ha empleado para realizar los ensayos de resistencia a compresión y módulo de deformación.



Figura 5.16. Equipo para evaluar la resistencia a compresión del hormigón.

5.3.4 Resistencia a tracción indirecta

Se realiza siguiendo el procedimiento descrito en UNE-EN 12390-6:2010. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas, por medio de la cual se somete a una probeta cilíndrica a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud. El resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante provoca que la probeta rompa a tracción (Figura 5.17).



Figura 5.17. Ensayo de resistencia a tracción indirecta.

5.3.5 Módulo de elasticidad

Se ha seguido para la realización de este ensayo la norma UNE 83316:1996 Ensayos de hormigón Determinación del módulo de elasticidad en compresión. Para este procedimiento la velocidad de aplicación de la carga es de $0,5 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$ por segundo y las medidas deben tomarse por lo menos en dos generatrices opuestas de la probeta de ensayo.

En los ensayos para esta tesis se toman medidas sobre 3 generatrices de la probeta. La tensión inicial del ensayo es de $0,5 \text{ N/mm}^2$, y para calcular la tensión final, se determinó previamente la resistencia a compresión del hormigón, ya que la tensión máxima que se alcanza en los ciclos de carga equivale a $f_c/3$. El equipo empleado es mismo que para el ensayo de resistencia a compresión, con una programación específica para la toma de datos, con el software Wintest 32 (Figura 5.18).

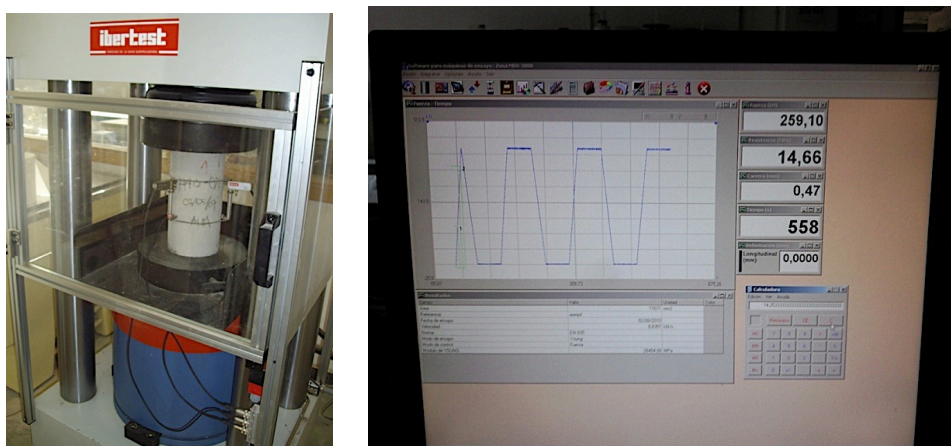


Figura 5.18. Ensayo para la evaluación del Módulo de Elasticidad.

5.3.6 Análisis de la microestructura del hormigón

Los hormigones son observados en un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo JEOL JSM6300 (Figura 5.19). El equipo cuenta con tres detectores principales: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución; un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie y un detector de Rayos X inducidos.



Figura 5.19. Microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo JEOL JSM6300. Universitat Politècnica de València.

Detector de electrones secundarios (SE): es el que ofrece la típica imagen en blanco y negro de la topografía de la superficie examinada. Es la señal más adecuada para la observación de la muestra por ser la de mayor resolución.

Detector de electrones retrodispersados (BSE): también ofrece una imagen de superficie aunque de menor resolución. Su ventaja consiste en que es sensible a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie. Al tener una superficie totalmente lisa se observan distintos tonos de gris en función de que existan varias fases con distintos elementos.

Detector de rayos X (EDS): es el que recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la energía de cada rayo X es característica de cada elemento, podemos obtener información

analítica cualitativa y cuantitativa de áreas del tamaño que deseemos de la superficie. Por ello se conoce esta técnica como Microanálisis por EDS.

Todas las muestras en estudio fueron evaluadas en alto vacío con un voltaje de aceleración de 20kV. Para llevar a cabo un análisis de las características morfológicas de los materiales en estudio, las muestras sólidas fueron recubiertas con una película de oro (Au) con el objetivo de asegurar la conductividad de las probetas (Figura 5.20. a.). El análisis semi-cuantitativo fue realizado en una unidad EDS de OXFORD INSTRUMENTS modelo Link-Isis, donde los resultados obtenidos fueron procesados con el programa INCa.

Las muestras fueron acondicionadas previamente para el ensayo, embebidas en una resina epóxica, posteriormente pulidas (Figura 5.20. b.) y recubiertas con una delgada película de grafito en la superficie con la finalidad de mejorar la precisión del detector. Como condiciones experimentales se empleó una distancia de 10 mm con un voltaje de aceleración de 20 kV.

La evaluación de las características de la interfase en hormigones constituidos con árido reciclado fue llevado en:

1. Muestras de Hormigón: Se tomaron probetas de hormigón con un 0% y 100% de árido reciclado con una edad de 90 días. De cada una se extrajeron pequeñas muestras (trozos), constituidos fundamentalmente con diferentes tipos de árido reciclado (Figura 5.20). Con estas muestras se obtuvieron imágenes de electrones secundarios con el propósito de observar la morfología de las interfase en estudio.
2. Pastas: Se preparó una pasta con una relación a/c de 0,5 y constituida por cemento CEM-I 52.5. Áridos reciclados secos de diferente naturaleza fueron introducidos en moldes cúbicos de 40x40mm y posteriormente curados bajo agua a 20°C. Luego de 28 días de curado se llevó a cabo un corte transversal de las probetas cúbicas para la obtención de muestras de 5mm de espesor, posteriormente pulidas y embebidas en resina epóxica (Figura 5.21). Estas muestras fueron empleadas para la obtención de imágenes por electrones retrodispersados y análisis EDS.

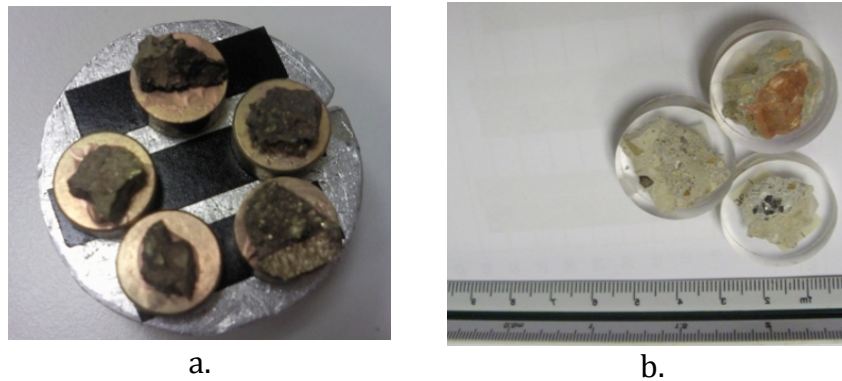


Figura 5.20. Acondicionamiento de las muestras para análisis SEM/EDS. a) Muestras de hormigón para la evaluación morfológica de la estructura. b) Muestras de hormigón embebidas en resina epóxica y pulidas para llevar a cabo análisis EDS.

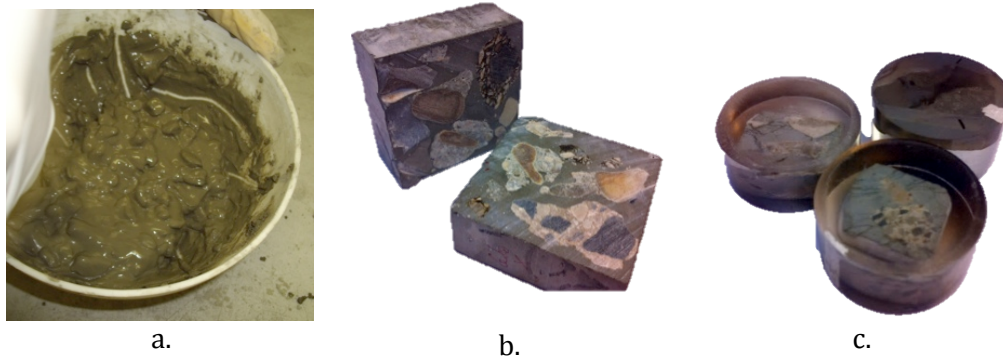


Figura 5.21. Fabricación de muestras para ser analizadas en el microscopio electrónico. a) Fabricación de la pasta con los áridos. b) Cortes realizados sobre las muestras cúbicas. c) muestras embutidas preparadas para el análisis.

5.4 Aspectos de Durabilidad. Análisis del transporte de fluidos y corrosión del hormigón

Se evalúan propiedades de durabilidad que permiten entender el fenómeno que ocurre en la matriz del hormigón cuando se sustituyen áridos reciclados por áridos naturales y como influyen éstos en el ingreso de sustancias agresivas desde el exterior.

5.4.1 Porosidad

La normativa española no establece un ensayo específico para la determinación de la porosidad del hormigón en estado endurecido. A partir de la norma ASTM-C642, 2006, se obtiene la porosidad accesible al agua, la cual repercute en el ingreso de sustancias agresivas desde el exterior.

Se utilizaron secciones centrales de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro que fueron cortadas con una altura de 100 mm. Dos probetas por hormigón y edad fueron ensayadas.

Para estimar la absorción se determinó la diferencia de peso existente en una probeta cilíndrica de 150x300mm secada en estufa hasta masa constante (M_s) y una después de permanecer sumergida 24 horas en agua (M_w) y secarse superficialmente, mediante la aplicación de la ecuación:

$$A_{abs} = \frac{M_w - M_s}{M_s} \times 100$$

La medición de la porosidad en laboratorio, se obtuvo saturando de agua la muestra (tras por lo menos 24h sumergida) y secándola en estufa a $100^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, examinado las diferencias de pesos con el uso de la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100$$

Donde: M_1 es el peso sumergido de la probeta saturada de agua, en la balanza hidrostática

M_2 es el peso de la probeta en estado saturado con superficie seca

M_3 , es el peso de la probeta en estado seco

5.4.2 Penetración de agua bajo presión (permeabilidad)

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE EN 12390-8: 2009 para la evaluación de la permeabilidad al agua bajo presión se utilizaron probetas

cilíndricas de 150x300 mm, que fueron cortadas por mitad y posteriormente dispuestas en el permeabilímetro bajo las condiciones de ensayo con la cara de corte en contacto con la zona de presión de agua. Dos probetas por hormigón y edad fueron cortadas y ensayadas.

Se analiza la permeabilidad de los hormigones sometidos a una presión de agua de 500 ± 50 KPa continuamente durante 72 horas (Figura 5.22.a), evaluando la profundidad máxima y media de penetración del agua sobre las mitades de la probeta, tras el corte de éstas con el ensayo de tracción indirecta, método brasileño (Figura 5.22.b).

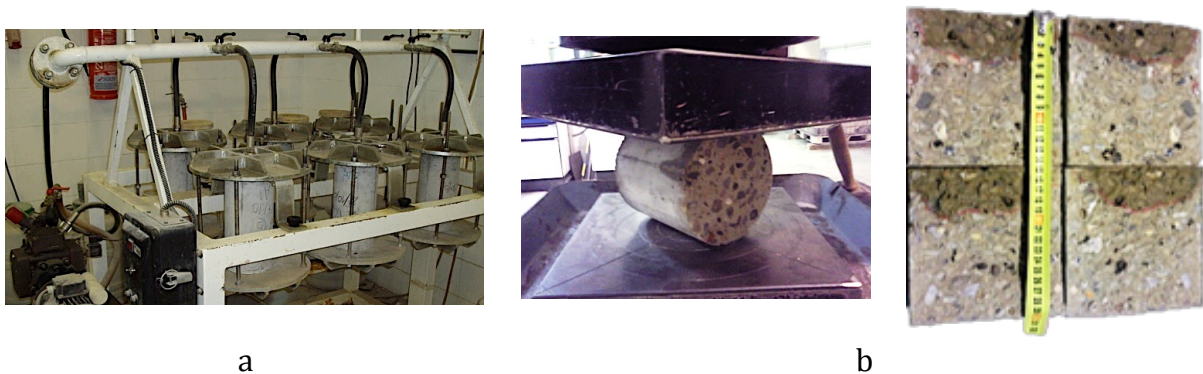


Figura 5.22. Ensayo de penetración de agua bajo presión. a) Probetas en el permeabilímetro. b) Rotura a tracción de la probeta para tomar las medidas de penetración máxima y media.

5.4.3 Succión capilar

Se realizó el ensayo de succión capilar siguiendo la metodología descrita en la norma UNE-83982, 2008, Durabilidad del hormigón. Método de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund, procedimiento que sigue la norma Suiza (SIA 162/1, 1989). El objeto es determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido.

El método consiste en registrar el cambio de peso (masa) de una muestra de hormigón que se encuentra en contacto con agua en uno de sus extremos con una altura de agua de 5mm.

Para cada hormigón se utilizan 3 probetas de 150mm de diámetro y 75mm (± 5 mm) de espesor cortadas de la parte central de una misma probeta cilíndrica de 150x300mm (Figura 5.23), para garantizar la uniformidad de los resultados como recomienda la norma. El acondicionamiento de las probetas para el ensayo se realiza siguiendo los parámetros de la norma UNE-83966, 2008, así, el perímetro de las probetas ha sido cubierto por una pintura impermeabilizante, con el fin de garantizar que el agua ingrese únicamente por la cara en contacto con el agua (Figura 5.24).

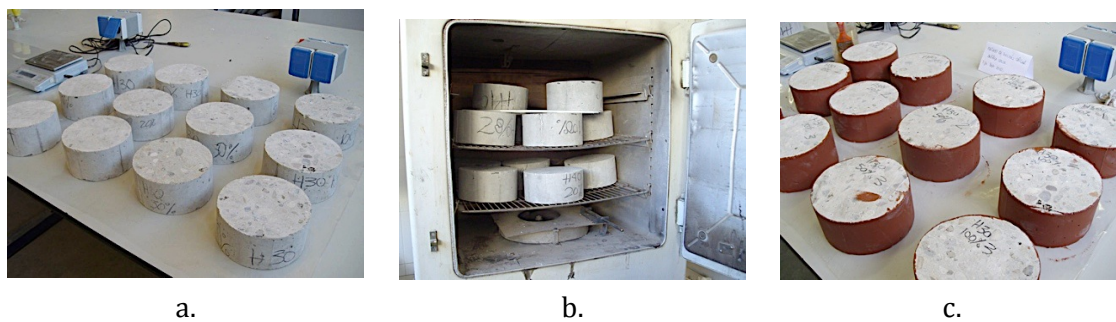


Figura 5.23. Preparación de muestras para el ensayo de succión capilar. a) cortado de las probetas b) secado de las probetas a 60°C. c) sellado del contorno de las probetas para su impermeabilidad.

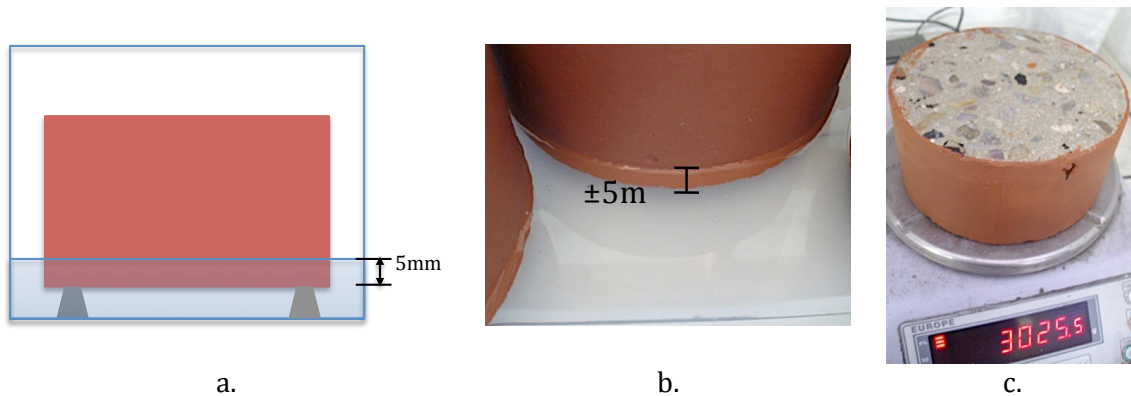


Figura 5.24. Ensayo de succión capilar. a) esquema del ensayo. b) probeta de hormigón durante el ensayo de succión. c) toma de pesos.

Se determina la masa de las probetas a diferentes intervalos de tiempo (Q_x) 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 24h, 48h, 72h, 96 h, etc., hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas espaciadas mínimo 24h es inferior al 0,1%. Se calcula la cantidad de agua absorbida ($Q_x - Q_0$).

En la Figura 5.25 se representa una curva típica de absorción de agua en el hormigón endurecido al relacionarse el incremento de masa (Q) con la raíz cuadrada del tiempo \sqrt{t} . La curva obtenida se caracteriza por presentar dos estados, en el primero se relaciona el llenado de agua por absorción a través de los poros capilares, mientras el segundo corresponde a la continuidad de este llenado a través de los poros de aire mediante el proceso de difusión y disolución del aire.

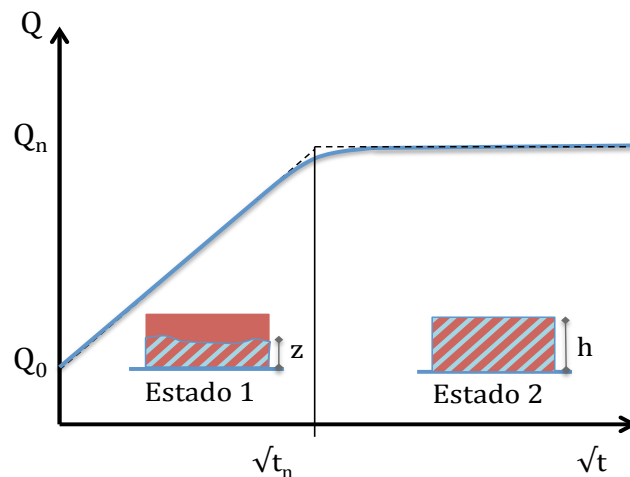


Figura 5.25. Curva típica del ensayo de absorción de agua por capilaridad en el hormigón endurecido.

El punto de intersección se obtiene del encuentro de las rectas ajustadas a cada periodo y hace referencia al momento en que el frente de agua alcanza la superficie superior de la probeta. Así Q_0 es la masa de la probeta al iniciar el ensayo y Q_n es el peso correspondiente para la intersección de las rectas es decir el momento en el que alcanza la saturación al que también le corresponde un $\sqrt{t_n}$. Como el tiempo en el que alcanza la saturación.

El cálculo del coeficiente de absorción de agua por capilaridad (K , $\text{Kg/m}^2\text{min}^{0,5}$) especificado en la norma viene dado por la ecuación:

$$K = \frac{\delta_a - \varepsilon_e}{10 \cdot \sqrt{m}} \quad \text{Con:} \quad \varepsilon_e = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot \delta_a} \quad \text{y} \quad m = \frac{t_n}{h^2}$$

Donde δ_a la densidad del agua (considerada como 1g/cm^3), ε_e es la porosidad efectiva del hormigón, m la resistencia a la penetración del agua por absorción capilar (min/cm^2), A es la sección de la probeta en cm^2 y h su espesor en cm .

El coeficiente de absorción capilar y la resistencia a la penetración de agua son parámetros que están relacionados entre si en forma indirecta y los dos dependen de la estructura de los poros. El valor de k también se ve afectado por la porosidad total (Fagerlund, 1982).

5.4.4 Penetración de Cloruros. Coeficiente de difusión

El coeficiente de difusión de cloruros D , fue evaluado mediante un ensayo de migración y un ensayo de difusión natural.

5.4.4.1 Ensayo de migración de cloruros

Para determinar la resistencia a la penetración de cloruros en el hormigón, se ha realizado un ensayo acelerado de migración bajo los criterios de la norma UNE 83987:2009, mediante la determinación del coeficiente de difusión para hormigón endurecido, tanto para el estado estacionario como no estacionario.

El ensayo se ha realizado sobre probetas cilíndricas de 75x30mm obtenidas por corte de testigos, en este caso extraídos de probetas cilíndricas de 150x300 mm (Figura 5.26) con la utilización de una perforadora acondicionada en el laboratorio para la extracción de estos. Después de cortadas las muestras fueron almacenadas en cámara húmeda hasta el momento de ensayo.

El ensayo consiste en situar las probetas obtenidas en las celdas (Figura 5.27), entre los dos compartimientos, en uno de los cuales hay una solución de NaCl 1M y en el otro agua des-ionizada. Para el ensayo se aplica un campo eléctrico de 12V entre las disoluciones que se encuentran en los dos compartimientos. El potencial eléctrico externo aplicado obliga a los iones cloruro a migrar a través de la probeta. La prueba se basa en medir la cantidad de cloruros que llegan al compartimento inicialmente libre de éstos, midiendo la conductividad periódicamente sobre esa solución.



Figura 5.26. Extracción de testigos y corte de muestras para el ensayo de Difusión de Cloruros.

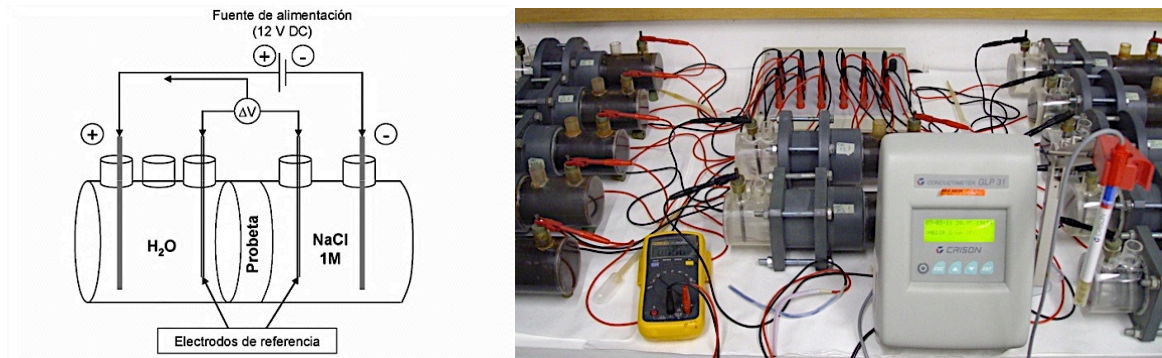


Figura 5.27. Esquema de montaje del ensayo de migración de cloruros y equipo (UNE 83987:2009)

En la Figura 5.28, se observan detalles de la preparación del ensayo con la toma de medidas y pesos de las probetas dispuestas para el ensayo. Las probetas son sometidas a vacío y saturadas con agua destilada para asegurar que el fenómeno que se presenta durante el ensayo es por difusión de cloruros y no por succión capilar en el hormigón. La solución de NaCl es preparada y se procede al llenado de

las celdas, aunque es importante previamente comprobar que no existen fugas en ningún compartimento (Figura 5.29).



Figura 5.28. Toma de diámetros, espesores y pesos de las probetas, y puesta en vacío y saturación de las muestras.

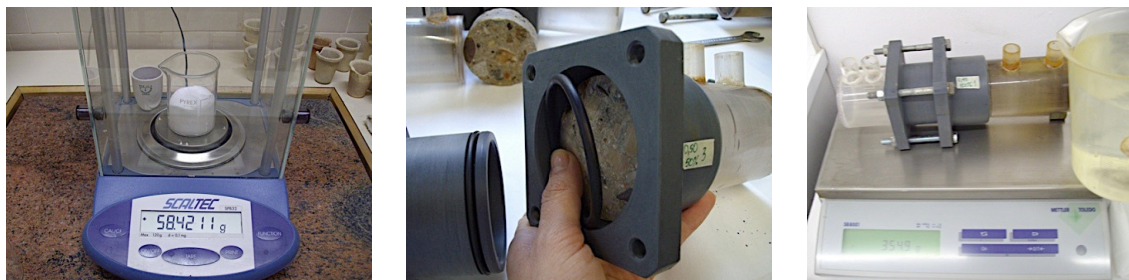


Figura 5.29. Preparación de la solución 1M NaCl, b) colocación de las muestras y llenado de las celdas.

En la Figura 5.30 se pueden observar imágenes del ensayo puesto en marcha, donde fueron tomadas periódicamente lecturas de voltaje y conductividad, para posteriormente determinar el coeficiente de difusión de iones cloruro en el hormigón endurecido según el ensayo de la norma UNE 83987: 2009. Método multirrégimen.



Figura 5.30. Ensayo según la norma UNE 83987: 2009 en marcha, toma de voltaje, lecturas de Conductividad y temperatura

Los datos de conductividad, diferencia de potencial y temperatura del agua, adquiridos durante el ensayo, se registran mínimo 3 veces al día. Los resultados de conductividad en función del tiempo, obtenidos durante el ensayo son registrados y representados gráficamente (Figura 5.31). Se identifican los periodos de estado estacionario y no estacionario, que corresponden a la etapa 1 y 2 de la grafica, mientras que el inicio de la etapa 3 establece el final del ensayo. El ensayo nos permite estimar el tiempo de paso (τ), que es el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo hasta que se alcanza un flujo constante de los iones cloruro, lo que significa el cambio de la condición de estado no estacionario a estacionario.

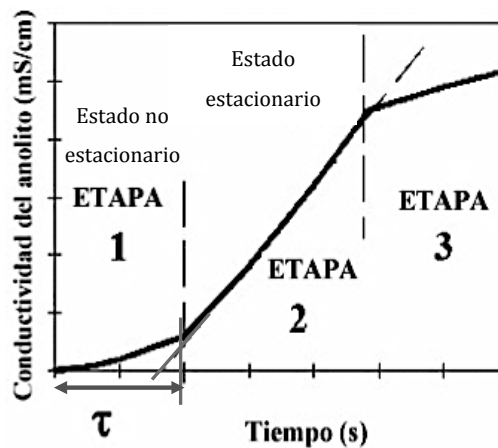


Figura 5.31. Representación esquemática de la evolución de la conductividad medida en el anolito durante el ensayo (UNE 83987:2009).

Los datos obtenidos son procesados hasta obtenerse un gráfico como el que, con datos reales, se presenta en la Figura 5.32. El cálculo de la cantidad de cloruros (en mol) se determina con los datos de la conductividad (mS/cm) eléctrica a partir de la siguiente ecuación:

$$Cl = 1 \times 10^{-3} (-1,71 + (11,45 \times C_{25})) V_a$$

Donde C_{25} es la conductividad eléctrica obtenida a 25°C en (mS/cm) y V_a el volumen del anolito (en Lt).

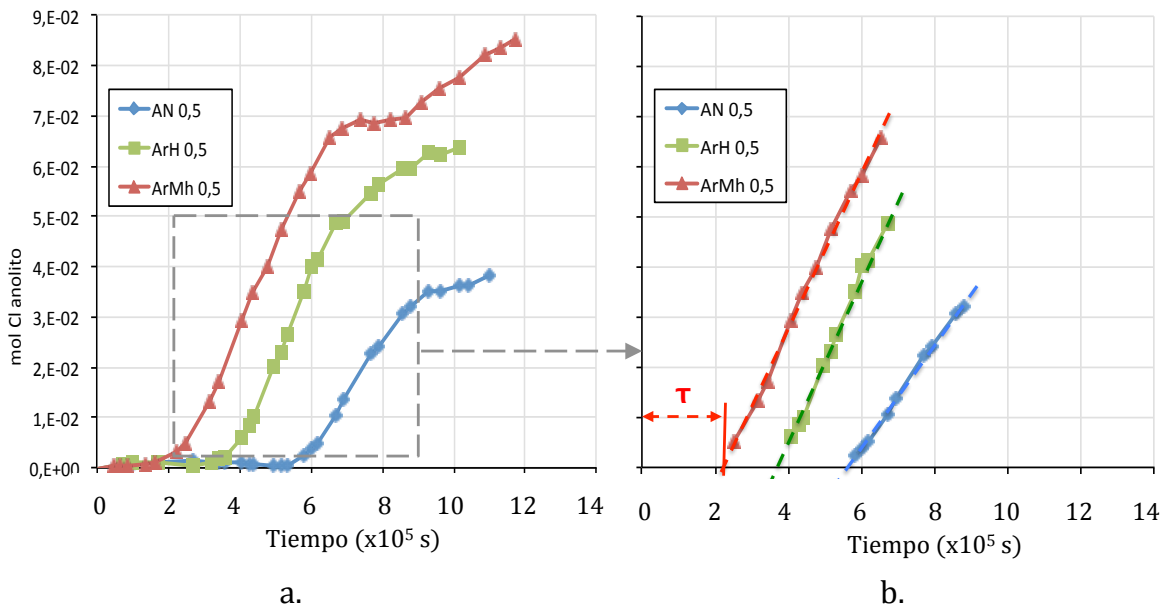


Figura 5.32. a) Evolución del contenido de cloruros en el anolito y b) regresión lineal del periodo correspondiente al estado estacionario y a la representación del tiempo de paso para hormigones con 0,5 de a_{ef}/c sometidos a ensayo a 30 días (medio plazo).

En la Figura 5.32.b. se muestra la regresión lineal de la parte ascendente de donde se obtiene la pendiente, y se determina el valor del tiempo de paso (τ) para el cálculo del coeficiente en estado estacionario D_s y del coeficiente en estado no estacionario D_{ns} , respectivamente.

A partir de los datos obtenidos se calculan los coeficientes de difusión en estado estacionario D_s y no estacionario D_{ns} (UNE 83987, 2009):

$$D_s \text{ (cm}^2\text{/s)} \quad D_{ns} \text{ (cm}^2\text{/s)}$$

$$D_s = \frac{A \cdot R \cdot T \cdot l}{z \cdot S \cdot F \cdot Cl \cdot \gamma \cdot \Delta\Phi_{ss}} \quad D_{ns} = \frac{2l^2(V - 2)}{\tau V^2} \quad \text{Con } V = 1,16 \cdot 10^4 \cdot \left[\frac{(\Delta\Phi)_t}{T} \right]$$

Donde:

- A Pendiente de la ecuación de regresión lineal del tramo del periodo de estado estacionario (mol/s)
- R Constante de los gases perfectos (cal/mol.K) 1,9872
- L Temperatura media del anolito durante el ensayo (K),
- z Espesor de la probeta en cm,
- S Valencia del ion cloruro (z=1),
- F Área superficial de la probeta expuesta a la disolución de cloruros (cm²),

Cl	Constante de Farady (cal/Veq) 23060,
γ	Concentración inicial de cloruro en el catolito (mol/cm^3)
$\Delta\Phi_{ss}$	Coefficiente de actividad de la disolución del catolito (0,657)
$\Delta\Phi_t$	Voltaje efectivo medio ponderado, durante el estado estacionario (V)
τ	Voltaje efectivo medio ponderado, durante el estado no estacionario (V)
	Tiempo de paso (s)

5.4.4.2 Análisis del contenido de Cloruros por difusión natural

Con el fin de establecer la cantidad de Cloruros que pueden haber penetrado en el hormigón expuesto al ambiente de agua de mar se siguió el procedimiento descrito en la norma UNE-EN-14629, 2007, mediante el método Volhard para determinar el contenido de iones cloruro solubles en ácido (libre y unido) del hormigón. La muestra se obtiene con las recomendaciones allí descritas, mediante perforaciones realizadas sobre la probeta para extraer el material, para cada profundidad analizada. Las muestras han sido obtenidas en polvo, mediante 4 perforaciones sobre cada probeta y para cada centímetro de profundidad, hasta llegar a 60mm. El polvo extraído se paso por el tamiz de 1mm (Figura 5.33).

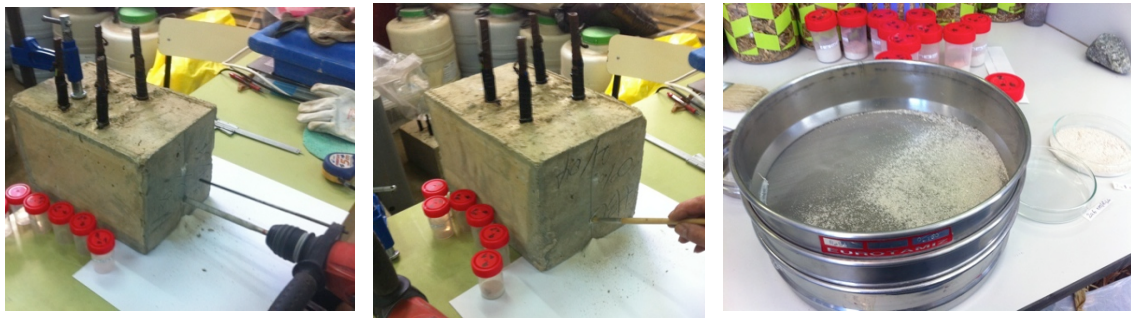


Figura 5.33. Toma de muestras sobre las probetas de ensayo y tamizado.

Las muestras fueron secadas en estufa a 100°C y almacenadas hasta el momento del ensayo, de manera que no tomaran humedad Figura 5.34. Los reactivos fueron preparados en el laboratorio de química de la UPV. Para la evaluación del contenido de cloruros se toma una muestra de $1\text{gr} (\pm 0,01)$ en un vaso de 250ml de capacidad, se añaden 50ml de agua des-ionizada, 10ml de ácido nítrico (5 mol/l) y 50 ml de agua caliente. La mezcla se calienta hasta ebullición y se mantiene al menos 3 min agitando constantemente. A continuación se procede al filtrado de la

solución y el lavado con ácido nítrico (1:100) del vaso, el filtro y el agitador Figura 5.35.

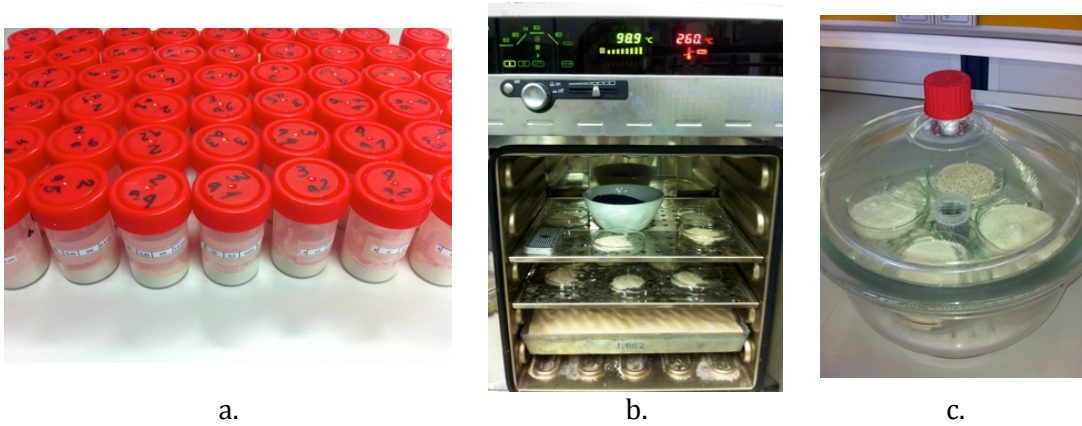


Figura 5.34. Ensayo para la determinación del contenido en cloruros del hormigón a) Muestras a ensayar. b) secado de las muestras en la estufa y c) conservación de las muestras hasta ensayo.

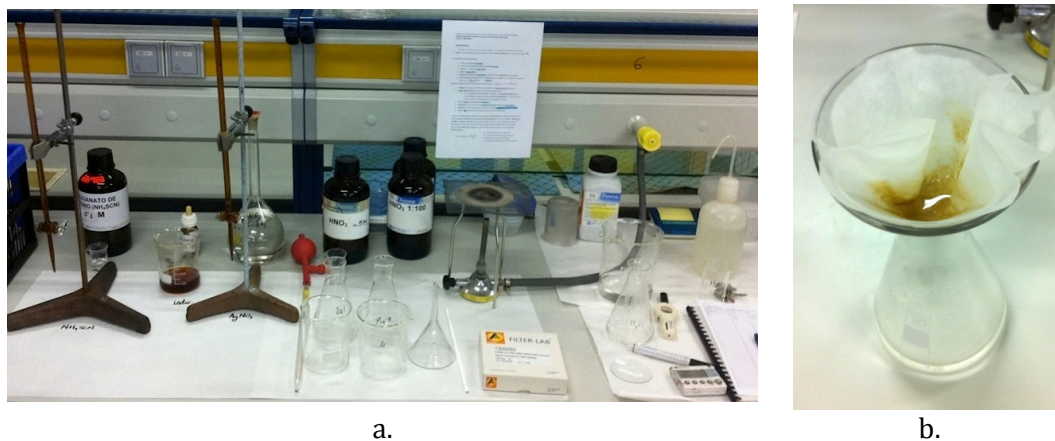


Figura 5.35. Ensayo de la norma UNE-EN-14629, 2007. a) Materiales necesarios para la valoración de cloruros en el hormigón b) filtrado de la muestra.

Cuando la solución está fría se realiza la valoración. Para ello se añaden 5 ml de nitrato de plata (0,02 m/l) (Figura 5.36.a), se agita enérgicamente y se añaden 5 gotas de la disolución indicadora de sulfato férrico de amonio. A continuación se añade gota a gota tiocianato de amonio (0,1 mol/l), agitando la solución (Figura 5.36.b) hasta observar el cambio de color en la muestra filtrada lo que determina la cantidad de disolución que permite una coloración rosa permanente que no desaparece después de la agitación (Figura 5.36.c).

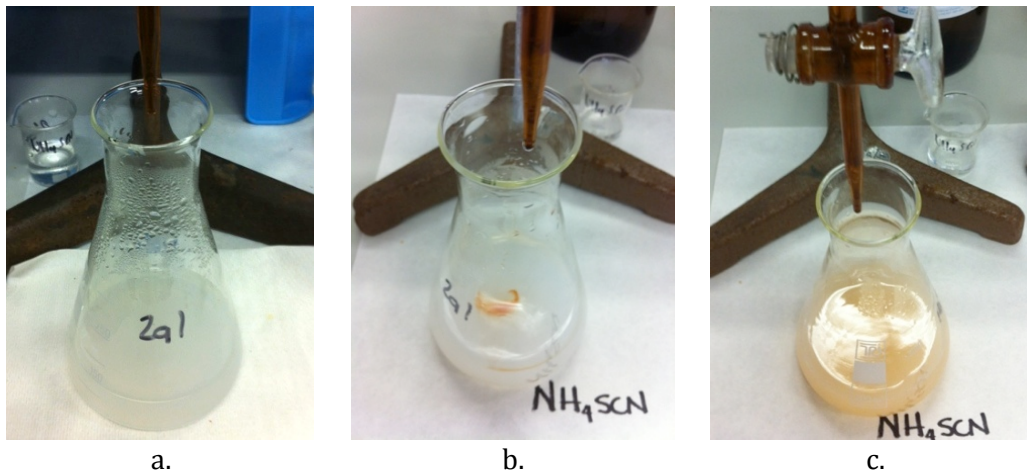


Figura 5.36. Determinación del contenido de Cloruros en el hormigón, valoración hasta el cambio de color (UNE-EN-14629, 2007) a) Muestra para valoración. b) adición gota a gota del tiocianato de amonio. c) cambio de viraje.

Una valoración sin muestra (en blanco) se realiza como referencia para el cálculo del contenido de cloruros de la muestra. Las lecturas del viraje son registradas y procesadas, según la siguiente ecuación:

$$CC = 17,725 \times f \times \frac{(V_2 - V_1)}{m}$$

Donde :
 V_1 volumen de la disolución de tiocianato de amonio para la valoración
 V_2 volumen de la disolución de tiocianato de amonio para el ensayo en blanco
 m masa de la muestra de hormigón
 f molaridad de la disolución de nitrato de plata (0,02)

La valoración del coeficiente de difusión de cloruros (estado no estacionario) a partir del contenido de cloruro CC fue realizada en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid con un modelo desarrollado en la Tesis doctoral (en proceso de terminación) de Michiel Fenaux. Modelling of chloride ion penetration into hardened concrete taking into account the microscopic properties of the material (2012).

5.4.5 Evaluación de la intensidad y el potencial de corrosión I_{corr} y E_{corr}

Para el análisis de la corrosión de armaduras en el hormigón con árido reciclado, se utilizó el corrosímetro GECOR6, un equipo que permite determinar la velocidad o intensidad de corrosión I_{corr} instantánea de las armaduras embebidas en el hormigón, mediante la técnica de la resistencia de polarización o polarización lineal, aplicada mediante el confinamiento de la señal, gracias al cual la medida de velocidad de corrosión se realiza sobre un área definida, por lo que el valor de la velocidad de corrosión obtenido corresponde al del lugar de la medida. Esta técnica no destructiva, se basa en la aplicación de una pequeña corriente sobre la armadura, midiéndose también la variación de potencial de corrosión E_{corr} . El GECOR6 calcula la intensidad de corrosión I_{corr} a partir de la resistencia de polarización por medio de la ley de “Stearn y Geary”.

El equipo está constituido por una unidad de medida y dos sensores diferenciados. La unidad de medida controla el sistema, realización de las medidas y procesamiento de los datos. Además conectada el sensor ECM-06A mide la intensidad de corrosión I_{corr} (A/cm²) sobre un área definida de la armadura, así como el potencial de corrosión E_{corr} (mV) con respecto a un electrodo de cobre/sulfato de cobre (CSE).

Las medidas se realizan colocando el sensor sobre la superficie de hormigón y estableciendo la correspondiente conexión eléctrica con la armadura. Debe colocarse una esponja húmeda para asegurar un adecuado contacto con la superficie de hormigón (Figura 5.37).

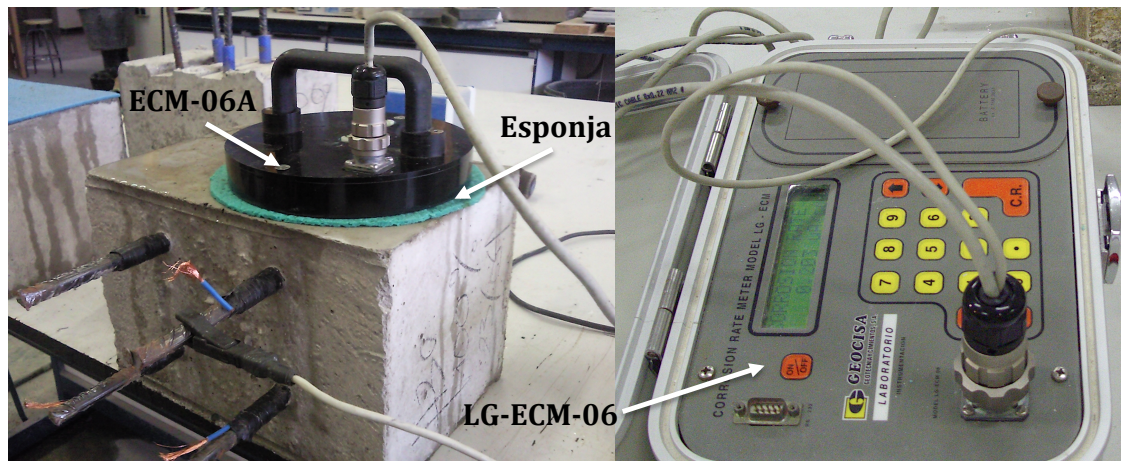
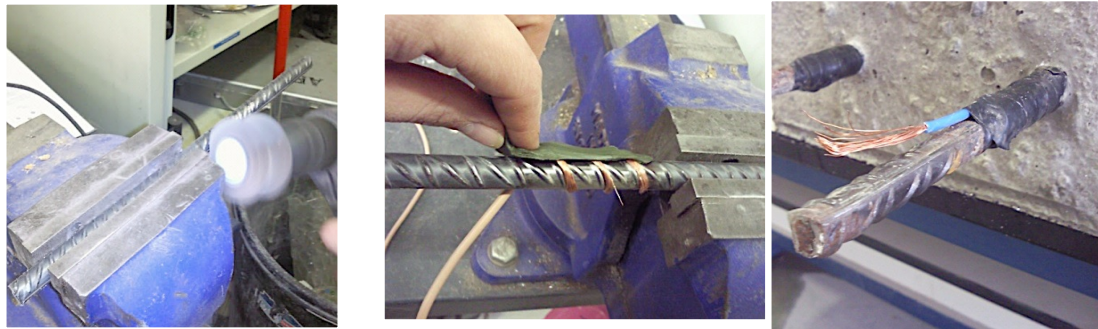


Figura 5.37. Equipo GERCOR6 para la toma de lecturas de velocidad y potencial de corrosión.

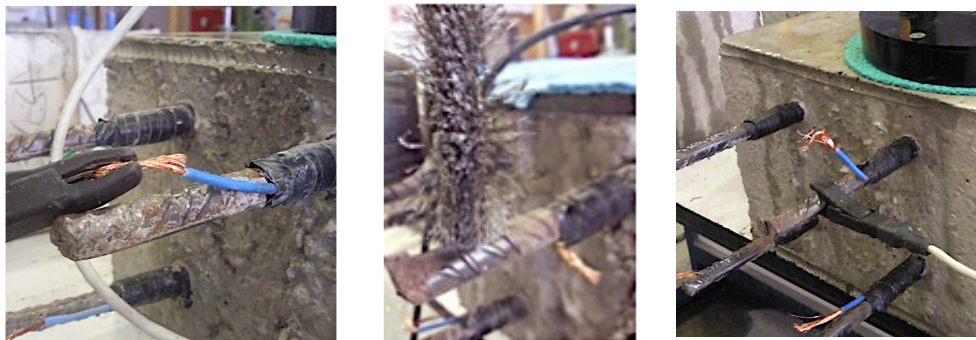
5.4.5.1 Procedimiento para la medida de la intensidad de corrosión

El sensor (ECM-06A) debe estar situado sobre la barra, conectado a la unidad de medida (LG-ECM-06) y en contacto eléctrico con la armadura. Es importante asegurar el contacto con la armadura, garantizando las lecturas respecto a la barra no corroída. A continuación en la Figura 5.38.a. se presentan algunos detalles del desarrollo experimental. Se observa como se dispuso el cable de cobre dentro de la armadura, como una alternativa que se utilizó inicialmente como el punto de mediada de referencia. Sin embargo en el momento de la lectura, también el cobre debía limpiarse, por lo que se prefirió tomar las lecturas directamente sobre la barra después de una completa limpieza en la zona de contacto como se observa en el grupo de fotografías de la Figura 5.38.b.

Las barras de acero embebidas en el hormigón, fueron colocadas limpias en los moldes diseñados (Figura 5.39.a), comprobando la distancia correspondiente según el recubrimiento establecido de 35 mm de un lado y 50 mm del otro (EHE-08). Las lecturas, siempre fueron tomadas con las probetas saturadas para disminuir la variabilidad entre los datos obtenidos y con la esponja completamente húmeda. En la Figura 5.39.b se observan las probetas en el momento de realizar las lecturas de corrosión.



a.



b.

Figura 5.38. Punto de contacto entre la unidad de medida y la barra de acero de refuerzo. a) Limpieza y colocación del cable de cobre en la armadura. b) limpieza de la armadura para garantizar el contacto adecuado con la barra de acero embebida.



a.



b.

Figura 5.39. Probetas para la evaluación de la corrosión. a) Montaje para la fabricación de las probetas. b) toma de lecturas E_{corr} e I_{corr} .

En estas condiciones el procedimiento para la toma de lecturas es el siguiente:

1. **Definición del área de medida:** Se introduce el valor del área de medida afectada por la señal, $A = 3,142 \times D \times 10,5$ (cm²), en este caso, las lecturas se realizaron sobre una única barra de 12mm de diámetro, por lo que el valor de $A = 39,5892$ cm².
2. **Ajuste del potencial de referencia:** Posteriormente el equipo mide el potencial de corrosión de la armadura y lo “anula” para medir los cambios de potencial creados por la corriente aplicada en el sensor.
3. **Control de la corrosión y potencial de equilibrio:** el equipo determina el E_r , potencial de corrosión de la armadura respecto al electrodo de Cu/CuSO₄ (E_{corr}), y V_s , que hace referencia a la diferencia de potencial entre los electrodos de referencia que controlan el confinamiento.
4. **Cálculo de la corriente aplicada óptima:** se inicia la fase 1, donde el equipo calcula la corriente aplicada óptima I_{ce} que se aplica al contraelectrodo en el paso final de medida (μA).
5. **Procedimiento de control de la polarización:** Los procedimientos anteriores polarizan el acero desde su potencial inicial, el cual decrecerá durante 30 segundos o hasta llegar a cero. Una estructura corroída tiende a despolarizarse rápidamente, mientras que una no corroída llevara mas tiempo (mV).
6. **Cálculo de la constante de equilibrio:** durante la fase 2 el equipo calcula la constante de equilibrio, para aplicar la corriente correcta por el contraelectrodo exterior, de forma que confine la corriente aplicada por el contraelectrodo central y defina correctamente el área de medida (μA/mV).
7. **Medida final:** la unidad de medida calcula la intensidad de corrosión utilizando los datos adquiridos por el sensor. Aparece como fase 3 y arroja las lecturas de:
 - ✓ Intensidad de corrosión (μA/cm²)
 - ✓ Potencial de corrosión (mV)
 - ✓ Resistencia Eléctrica (KΩ)
 - ✓ Tiempo de polarización (s)
 - ✓ Área de la barra (cm²)

Los valores de la velocidad de corrosión medidos con el GERCOR6, brindan una información precisa acerca del riesgo de corrosión. Se utiliza el siguiente criterio de evaluación:

I_{corr}	< 0,2 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Estado pasivo
	0,2 a 0,5 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Baja corrosión
	0,5 a 1 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosión moderada
	> 1 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Alta velocidad de corrosión

La medida del potencial de corrosión proporciona información cualitativa sobre el riesgo de corrosión de las armaduras, por lo que se establece:

E_{corr}	Mayor que -200mV	Probabilidad de corrosión < 10%
	Entre -200 mV -350mV	Probabilidad de corrosión 50%
	Menor que -350mV	Probabilidad de corrosión > del 90%

Tomando como referencia los rangos presentados, se evalúa en el capítulo 8 el nivel de corrosión de las armaduras de hormigones con árido reciclado. Las lecturas de E_{corr} e I_{corr} fueron tomadas a lo largo de dieciséis meses con el GECOR6, sobre probetas expuestas a un ambiente marino, simulado las situaciones descritas en el programa experimental (apartado 4.3.3) por medio de dos tanques con agua de mar artificial (Figura 5.40).



Figura 5.40. Preparación de agua de mar para simulación del ataque en hormigón armado. Y probetas sometidas al ambiente agresivo.

Capítulo 6

Estudios previos

En este capítulo se presentan los materiales utilizados, los ensayos realizados para su caracterización y un conjunto de actividades cuya finalidad fue fijar criterios de fabricación de hormigón con áridos reciclados utilizados para el resto del trabajo.

Se realiza una selección de materiales, áridos naturales comúnmente utilizados y áridos reciclados procedentes de plantas de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición españolas, con el propósito de utilizar un material de producción comercial disponible para la ejecución de hormigón estructural. Sobre ellos se evalúan las propiedades geométricas, físicas y mecánicas. Propiedades como densidad, capacidad de absorción, granulometría, son determinadas para todos los áridos utilizados. Sobre los áridos reciclados un análisis más específico de su composición y cantidad de mortero adherido, es realizado.

Para el análisis de la variabilidad del árido reciclado en el hormigón y cumpliendo con las exigencias y recomendaciones existentes sobre el tipo de árido reciclado para uso en hormigón estructural, se han buscado áridos reciclados con un contenido en áridos de hormigón y áridos naturales (R_c+R_u) superior al 90%, denominado ArH por la GEAR (GEAR project 2011). Para el desarrollo de este apartado se fabrica hormigón con el árido reciclado presaturado (A_{R10}), según el procedimiento establecido en el proyecto CLEAM (CLEAM 2011). Porcentajes de

sustitución de 20%, 50% y 100% de árido reciclado y dos relaciones agua cemento a_{R10}/c 0,45 y 0,55, son empleadas para este apartado.

6.1 Materiales

6.1.1 Cemento

Se seleccionó por un cemento Portland tipo I de resistencia 52,5 MPa a 28 días con resistencia inicial normal N y resistente a los sulfatos (I 52.5 N/SR). Este cemento sin componentes o adiciones y resistente a los sulfatos y agua del mar, es muy adecuado para utilizar en obras expuestas a ambientes agresivos, por lo tanto adecuado para el desarrollo de este trabajo, teniendo en cuenta que uno de los objetivos de la tesis, es evaluar también la corrosión en un hormigón expuesto al ambiente marino (ambiente agresivo tipo III, según EHE-08). Al utilizar un cemento de estas características, se cumple con las especificaciones y únicamente se evalúa la influencia del árido reciclado sobre las propiedades del hormigón.

En la Tabla 6.1 se presentan las características físicas, químicas y mecánicas del cemento, proporcionado por Cemex (Alcanar y Alicante).

Tabla 6.1. Resultados de ensayos sobre el cemento.

Especificaciones	Propiedad	Resultados Ficha técnica	Requisitos RC-08*
Componentes UNE-EN 197-1:2000	Clinker	95-100 %	95 a 100 %
	Componentes adicionales	0-5 %	0 a 5 %
Características Químicas UNE-EN 196-2:2006	Pérdida por Calcinación (P.P.C.)	2,6 %	≤ 5,0 %
	Residuo insoluble (R.I.)	1,3 %	≤ 5,0 %
	Anhídrido Sulfúrico (SO ₃)	3,5 %	≤ 4,0 %
	Cloruros (Cl)	0,01 %	≤ 0,1 %
Características Físicas UNE-EN 196-3:2005	Principio de fraguado	150 min	≥ 45 min
	Expansión Le Chatelier	0 mm	≤ 10 mm

Tabla 6.1. Resultados de ensayos sobre el cemento (continuación).

Especificaciones	Propiedad	Resultados Ficha técnica	Requisitos RC-08*
Características Mecánicas UNE-EN 196-1:2005	Resist. a Compresión 2 días	35 MPa	≥ 20,0 MPa
	Resist. a Compresión 28 días	57 MPa	≥ 52,5 MPa
Características Adicionales del Clinker UNE 80303	Aluminato tricálcico (C ₃ A)	4%	≤ 5,0 %
	Aluminato tricálcico + ferrito		
	Aluminato tetracálcico (C ₃ A+C ₄ AF)	16%	≤ 22,0 %

*REAL DECRETO 956/2008, de 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-08).

6.1.2 Áridos naturales

Fueron utilizados áridos naturales de piedra caliza machacada procedentes de la planta Soival. Para todos los hormigones se utilizó árido fino natural, arena machacada 0/4mm (A0/4).

Como árido grueso natural se empleó árido machacado 12/20mm (G12/20) y árido machacado 7/12mm (G7/12). Sus propiedades físicas geométricas y mecánicas, son analizadas mediante ensayos de granulometría, densidad, absorción, índice de lajas y coeficiente de los ángeles. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.2 donde se hace referencia a la norma utilizada y las curvas granulométricas se presentan en la Figura 6.1.

Tabla 6.2. Propiedades de los áridos naturales.

Propiedad	Arena	Grava	
	A0/4	G7/12	G12/20
Densidad tras secado en estufa ρ_{rd} (Kg/m ³) UNE EN 1097-6	2570	2580	2610
Absorción (%) UNE EN 1097-6	1,80	1,24	1,07
Modulo granulométrico UNE EN 933-1	3,22	6,10	9,03
Índice de Lajas UNE EN 933-3	-	10,81	9,77
Coeficiente Los Ángeles UNE-EN 1097-2	-	-	29,12

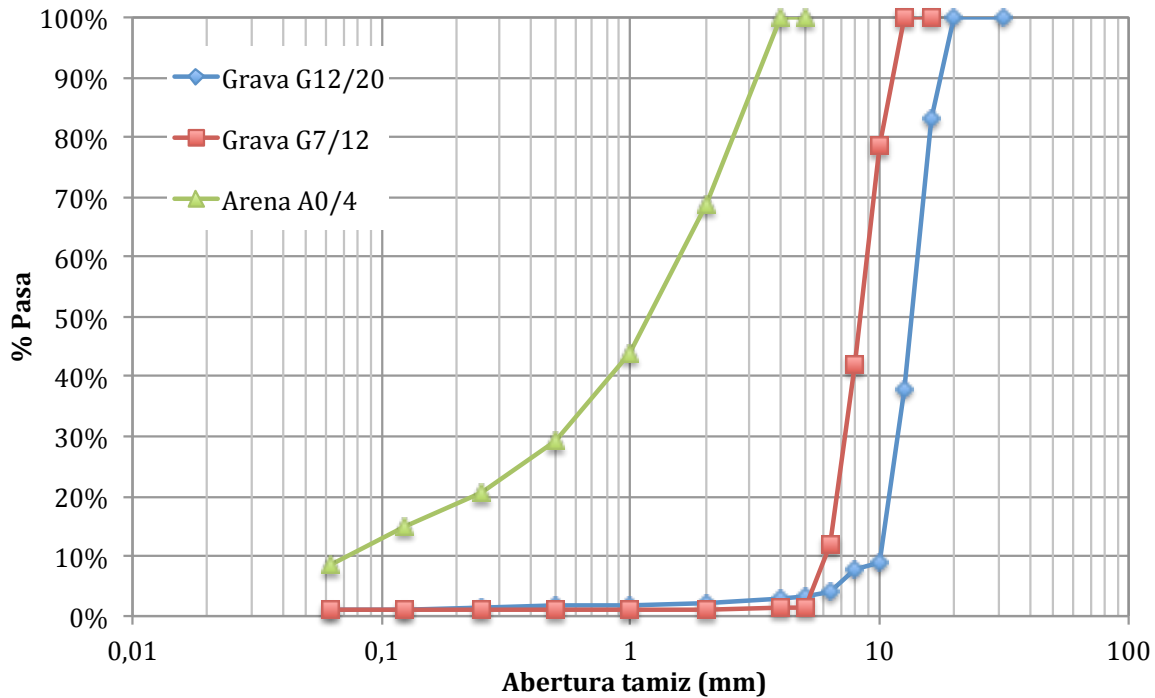


Figura 6.1. Curva granulométrica de los áridos naturales. UNE EN 933-2.

6.1.3 Áridos reciclados

Se han utilizado cinco áridos reciclados de hormigón (**ArH**) de Residuos de Construcción y Demolición de distinta procedencia, con un tamaño 4/20mm.

En un principio los áridos no se han podido adquirir fácilmente debido al escaso mercado existente para esta aplicación concreta, encontrándose generalmente áridos reciclados clasificados como mixtos con hasta un 30% de materiales cerámicos y con tamaños de árido mucho mayores a los requeridos. Gracias a la participación de la UPV, en distintos proyectos desarrollados para el estudio de los áridos reciclados se obtiene árido de distintas fuentes de origen. En la Tabla 6.3 se describe el origen de los áridos reciclados utilizados:

Además, un árido reciclado de tipo mixto de hormigón (**ArM h**) según la guía (GEAR project 2011), se utilizó en el desarrollo de esta tesis, únicamente para el análisis de la penetración de cloruros en el ensayo de migración (apartado 8.1.5.), para evaluar la tendencia de las propiedades de un hormigón con árido de menor

calidad. El ArMh ha sido proporcionado por la planta de Gestión de Residuos Belcaire.

Tabla 6.3. Detalle del origen y fuente del árido reciclado de hormigón.

Proyecto participación de la UPV	Denominación del ArH	Descripción de origen
(CLEAM 2011)	1- Madrid.	Árido reciclado fracción 4/20mm, producto del procesamiento de residuos de hormigón de edificación y de autovías, procesados en la planta Tec-Rec, localizada en Madrid.
(RECNHOR 2008)	2- Obra VLC	Árido reciclado de hormigón 4/20mm, obtenido del procesamiento de los residuos de la demolición del puente, entre Manises y Paterna, sobre el río Turia. los RCD fueron llevados a Madrid y procesados en la planta Tec-Rec.
(GEAR project 2011)	3- Moncofa	Árido reciclado de RCD producido en la Planta de Gestión de Residuos Belcaire, localizada en Moncofa, utilizado para la ejecución de un tramo de hormigón Compactado con Rodillo con 100% de árido reciclado.
	4- Benicarló	Árido reciclado de RCD de hormigón, de la planta de Gestión de Residuos Tramed 21 fracción 0/40mm. Tamizado en el laboratorio de la UPV para obtener solo la fracción 4/20 mm.
	5- Murcia	Árido reciclado de RCD de hormigón, de la Planta de Gestión de Residuos Contenedores Astesa. Tamizado en el laboratorio de la UPV con el fin de obtener solo la fracción 4/20 mm, de la 0/40mm de la cual disponían.

Se presentan en la Tabla 6.4 los resultados de los ensayos de caracterización realizados sobre los áridos reciclados (5 de tipo ArH y 1 de tipo ArMh), y en la Figura 6.2 se presentan las curvas granulométricas correspondientes para los áridos reciclados evaluados.

Tabla 6.4. Propiedades de los áridos reciclados, resultados de los ensayos.

Tipo de árido reciclado de RCD	Procedencia	Densidad tras secado en estufa ρ_{rd} (Kg/m ³) UNE EN 1097-6	Absorción (%) UNE EN 1097-6	Coefficiente de Los Ángeles (%) UNE EN 1097-2	Modulo granulométrico UNE EN 933-1
ArH	1- Madrid	2352	4,51	30,1	8,56
	2- Obra VLC	2354	4,68	28,6	7,78
	3- Moncofa	2348	5,26	30,8	8,69
	4- Benicarló	2332	6,05	33,6	7,32
	5- Murcia	2319	5,80	32,2	7,45
	<i>Promedio ArH</i>	<i>2341</i>	<i>5,26</i>	<i>31,1</i>	<i>7,96</i>
	<i>CV_{ArH}</i>	<i>0,64%</i>	<i>12,8%</i>	<i>6,2%</i>	<i>7,9%</i>
ArM h	ArMh	2095	8,59	35,2	7,20

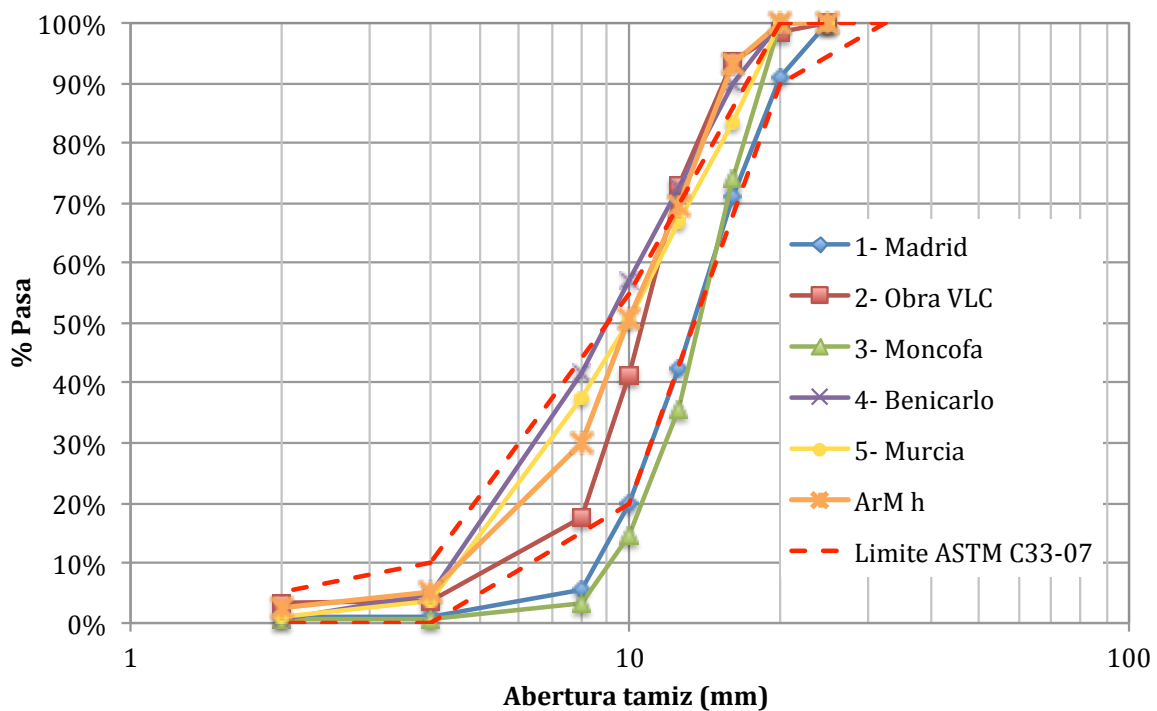


Figura 6.2. Curva granulométrica de los áridos reciclados gruesos. UNE EN 933-2.

Frente a los ensayos de caracterización para los áridos reciclados de hormigón (ArH), se ha evaluado el valor medio de cada propiedad entre las cinco procedencias y el coeficiente de variación del conjunto. La densidad es una propiedad poco susceptible al cambio de árido (ArH), se encontró un coeficiente de

variación cercano al 0,7%, lo que indica que están sobre el mismo orden. Sin embargo al comparar el valor medio de la densidad árido reciclado de hormigón (ArH) con el árido reciclado mixto de hormigón (ArMh), se aprecia una clara diferencia y se observa que la densidad para el ArMh disminuye un 10,5%.

La capacidad de absorción es la propiedad más susceptible tanto al cambio de procedencia de un mismo tipo de árido reciclado (ArH) como al cambio en el tipo de árido reciclado, encontrando que ésta llega a incrementar hasta un 63% para el árido reciclado mixto de hormigón (ArMh) respecto al árido reciclado de hormigón (ArH); el coeficiente de variación entre los áridos reciclados de hormigón llega a un 13% con valores entre 4,5% y 6,05%.

Las normas internacionales establecen límites de absorción para los áridos reciclados de hormigón mucho menos restrictivos que la Instrucción española EHE-08, sin embargo para este caso todos los valores obtenidos están por debajo del 7% exigido en la EHE, cumpliendo así los límites establecidos para áridos reciclados en hormigón. La instrucción española EHE-08 establece que únicamente áridos reciclados de hormigón ($R_c+R_u>90\%$) pueden ser utilizados, así que no se presentan límites para áridos reciclados mixtos de hormigón ($R_c+R_u>70\%$) que supera el mencionado límite de 7%.

Respecto al coeficiente de los ángeles entre los áridos reciclados de hormigón (ArH) se observa un coeficiente de variación de 5,6% con valores que están alrededor de 30%, sin llegar a 35%. Solo el árido reciclado mixto presenta 35,2% ya que además de la fragmentación sobre el mortero adherido, se observó la disgregación de las partículas de albañilería.

En España no existe una especificación sobre la granulometría del árido grueso para ser utilizado en hormigón, aunque para evaluar la distribución de tamaños, se pueden comparar con el rango que establece la norma ASTM C-33 para árido grueso. En la Figura 6.2 se presentan estos usos granulométricos para un tamaño 19mm y las curvas granulométricas de los áridos reciclados analizados.

Además de los correspondientes ensayos de densidad, absorción, coeficiente de los ángeles y granulometría, un ensayo de clasificación de constituyentes e impurezas (UNE-EN 933-11) fue realizado sobre los áridos reciclados (Tabla 6.5), como una forma de clasificación normalizada.

Tabla 6.5. Clasificación de los constituyentes en los áridos reciclados gruesos. UNE-EN 933-11.

Constituyentes del árido grueso reciclado	Tipo de árido grueso reciclado de RCD de hormigón ArH					ArMh
	1- Madrid	2- Obra VLC	3- Moncofa	4- Benicarló	5- Murcia	ArM h
% Ra	4,3	0,7	1,3	0,6	0,1	1,37
% Rb	1,9	0,0	6,4	1,8	1,1	20,89
% Rc	66,4	69,4	67,5	76,0	80,7	71,33
% Ru	27,2	29,0	24,5	20,8	16,9	6,09
% Rg, FL, X	0,3	0,9	0,5	0,8	1,2	0,44

Ra (materiales bituminosos)

Rb (elementos de albañilería de arcilla, de silicato cálcico y hormigón aireado no flotante)

Rc (hormigón, productos de hormigón, mortero, elementos de albañilería de hormigón)

Ru (áridos no ligados, piedra natural, árido ligado hidráulicamente)

Rg (vidrio)

FL (materiales flotantes)

X (arcilla, tierra, yeso, plástico, madera y otros)

La suma de Rc+Ru, debe ser más del 90% para que el árido reciclado sea considerado “de hormigón” y por lo tanto válido para el uso en hormigón estructural. Este requisito es cumplido por los áridos reciclados de hormigón presentados en este apartado. Encontrando que el árido reciclado 1 (Obra VLC), evidentemente presenta el mayor porcentaje de Rc+Ru con 98,45%, mientras que el árido reciclado 3 de Moncofa presenta un 92,02%. El árido reciclado mixto (ArMh) presenta Rc+Ru igual a 77,4%, menor que el 90% requerido para los reciclados de hormigón, de ahí su categorización según la (GEAR project 2011).

Finalmente un ensayo sobre la cantidad de mortero adherido en los áridos reciclados de hormigón es realizado siguiendo el método térmico (Barra 1996) y los resultados son presentados en la Tabla 6.6. Este ensayo se realizó en su momento sólo para los áridos reciclados de Madrid, Obra VLC y Moncofa y está muy relacionado con la capacidad de absorción del árido reciclado.

Tabla 6.6. Mortero adherido en áridos reciclados

Mortero Adherido (%)	Fracción 4/8 mm	Fracción 8/16 mm
1- Madrid	30,34	23,94
2- Obra VLC	31,50	17,85
3- Moncofa	27,80	22,25

En el apartado 2.1.4.1 se observa que los valores de mortero adherido son muy heterogéneos, influenciados también por el tipo de metodología de ensayo que se realice, por lo tanto, se toma como un valor de referencia importante pero no determinante. La capacidad de absorción de agua se considera como valor significativo para valorar la calidad de los áridos reciclados.

6.1.4 Agua

Para la fabricación de los hormigones se utiliza agua potable. Además en todo el estudio se determinó el estado de humedad de los áridos, con mayor control sobre los áridos reciclados, para establecer la cantidad de agua aportada por éstos al ser introducidos en la mezcla de hormigón.

6.1.5 Aditivos

Se utilizó un superplastificante (Sikament 500 HE), exento de cloruros, para mejorar la trabajabilidad. Cumple con la norma UNE-EN 934-2 (Tabla 12: acelerante / reductor/ plastificante). La dosificación recomendada está entre el 0,7% y el 2% del peso de cemento y sus características de acuerdo con la ficha técnica del suministrador se presentan en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Datos de la ficha técnica del producto proporcionados por el fabricante

Datos Técnicos	
Composición química	Copolímeros vinílicos modificados y agentes orgánicos minerales
Densidad (20°C)	1,15 kg/l aprox.
Valor del pH	7,5 aprox.
Contenido en sólidos	28% aprox.

6.2 Influencia de la continuidad de calidad del árido reciclado en la resistencia a compresión del hormigón

En este apartado se estudio el efecto que tiene la sustitución total o parcial del árido grueso reciclado sobre la resistencia a compresión simple del hormigón y su variabilidad. Se realizó una evaluación de la variabilidad en los resultados de resistencia a compresión en hormigones al ser fabricados con áridos reciclados de hormigón de diferente procedencia y con distintos porcentajes de sustitución. Se presenta a continuación el análisis de la variabilidad en la resistencia a compresión a 7 y 28 días, para hormigones con los cinco tipos de árido reciclado de hormigón (ArH) previamente analizados que presentan características geométricas y físicas adecuadas para su uso en hormigón según la EHE (Ministerio de Fomento de España 2008). Hormigones con sustituciones de 20%, 50% y 100% de árido reciclado, siempre comparados respecto a un hormigón de referencia fabricado con áridos naturales (H 0%) son estudiados. Para esta sección se evalúan hormigones con dos relaciones a_{R10}/c 0,45 y 0,55, que corresponde a las condiciones de fabricación tipo E3 descritas en la tabla 4.3 y las dosificaciones para H0%, surgen del proyecto (CLEAM 2011).

Para cada hormigón con árido reciclado se ajusto la dosificación de manera que la proporción en peso del árido reciclado sobre el árido grueso total fue establecida en cada caso. Las cantidades de cada árido (arena, gravilla, grava natural y árido reciclado) se determinaron ajustando la curva mezcla que incluye el cemento al ajuste granulométrico más próximo a la curva de referencia obtenida por el método de Bolomey (1935), con $a=13$ y $D=20$. Para cada proporción de árido reciclado (20%, 50% y 100%) se determino el ajuste granulométrico correspondiente. Se presentan a continuación las dosificaciones obtenidas para los hormigones con árido natural (Tabla 6.8) y con árido reciclado (Tabla 6.9 y Tabla 6.10).

Tabla 6.8. Dosificación por m³ para hormigones con árido natural 0% y relación a_{R10}/c 0,45 y 0,55 (E3).

Cantidades en Kg/m ³	Árido Natural 0%	
	a _{R10} /c 0,45	a _{R10} /c 0,55
Agua	173	179
cemento	385	325
Arena	865	939
Gravilla	275	268
Grava	734	691

 Tabla 6.9. Dosificación por m³ para hormigones con árido reciclado y relación a_{R10}/c 0,45 (E3).

Cantidades en Kg/m ³	a _{R10} /c 0,45					% Sust.
	1- Madrid	2- Obra VLC	3- Moncofa	4- Benicarlo	5- Murcia	
Agua	173	173	173			
cemento	385	385	385			
Arena	955	985	924			20%
Gravilla	210	168	233			
Grava	518	540	519			
Reciclado	182	177	188			
Agua	173	173	173	173	173	
cemento	385	385	385	385	385	
Arena	942	936	951	968	982	50%
Gravilla	118	110	120	111	95	
Grava	331	350	324	319	333	
Reciclado	449	460	444	430	428	
Agua	173	173	173	173	173	
cemento	385	385	385	385	385	
Arena	916	907	918	904	893	100%
Gravilla	0	0	0	0	0	
Grava	0	0	0	0	0	
Reciclado	913	924	898	909	913	

Tabla 6.10. Dosificación por m³ para hormigones con árido reciclado y relación ar₁₀/c 0,55 (E3).

Cantidades en Kg/m ³	ar ₁₀ /c 0,55					% Sust.
	1- Madrid	2- Obra VLC	3- Moncofa	4- Benicarlo	5- Murcia	
Agua	179	179	179			
cemento	325	325	325			
Arena	969	966	978			20%
Gravilla	220	194	201			
Grava	508	527	508			
Reciclado	175	180	177			
Agua	179	179	179	179		
cemento	325	325	325	325		
Arena	955	959	983	962		50%
Gravilla	122	101	111	125		
Grava	327	349	323	316		
Reciclado	449	450	434	441		
Agua	179	179	179	179	179	
cemento	325	325	325	325	325	
Arena	960	970	995	829	735	100%
Gravilla	0	0	0	0	0	
Grava	0	0	0	0	0	
Reciclado	873	869	836	989	1062	

Las mezclas fueron preparadas manteniendo los parámetros de aditivo fijos para cada hormigón. Los áridos reciclados fueron previamente saturados durante 10 minutos, con un escurrimiento posterior durante un periodo de tiempo de 10 minutos. Este proceso de saturación, fue el realizado en el proyecto CLEAM, 2011 dentro del que se enmarca este apartado. Para la fabricación de todos los hormigones se siguió el procedimiento descrito en la norma (ASTM-C192 2007), como se describió en el apartado 5.2.

Para cada mezcla se evaluó, en estado fresco la trabajabilidad por medio del cono de abrams siguiendo la norma UNE EN 12350-2:2009. La fabricación y curado de las probetas se realiza según la UNE EN 12390-2:2009, utilizando la mesa vibrante

para la compactación del hormigón. Las probetas fueron curadas en cámara húmeda hasta el momento de la rotura.

Se determina la resistencia a compresión (Figura 6.3), para cada mezcla se ensayan hasta rotura, 3 probetas cilíndricas de 150x300 mm para cada edad (a 7 y 28 días), según las especificaciones de la UNE EN 12390-3:2009.



Figura 6.3. Roturas satisfactorias en las probetas sometidas a ensayo.

6.2.1 Resultados y análisis

Para su mejor interpretación los resultados se presentan de forma gráfica. Un análisis estadístico se realiza para analizar la variabilidad de los resultados de resistencia a compresión del hormigón.

En la Figura 6.4 se observa que la densidad de todos los hormigones se mueve en un rango entre 2250 Kg/m³ y 2400 Kg/m³, afectada por el porcentaje de sustitución y el tipo de árido reciclado. Evidentemente la densidad disminuye a medida que aumenta la cantidad de árido reciclado utilizado en la mezcla.

En la Figura 6.5 pueden ser observados los resultados medios de resistencia a compresión a 7 días, con las correspondientes barras de error. Para hormigones con sustituciones del 20% al 100% de árido reciclado, con relación a_{R10'}/c de 0,45 los valores se encuentran entre 27,5MPa y 44, 5 MPa; Mientras que para una relación a_{R10'}/c de 0,55 los valores de resistencia están entre 20,0 MPa y 37,9 MPa.

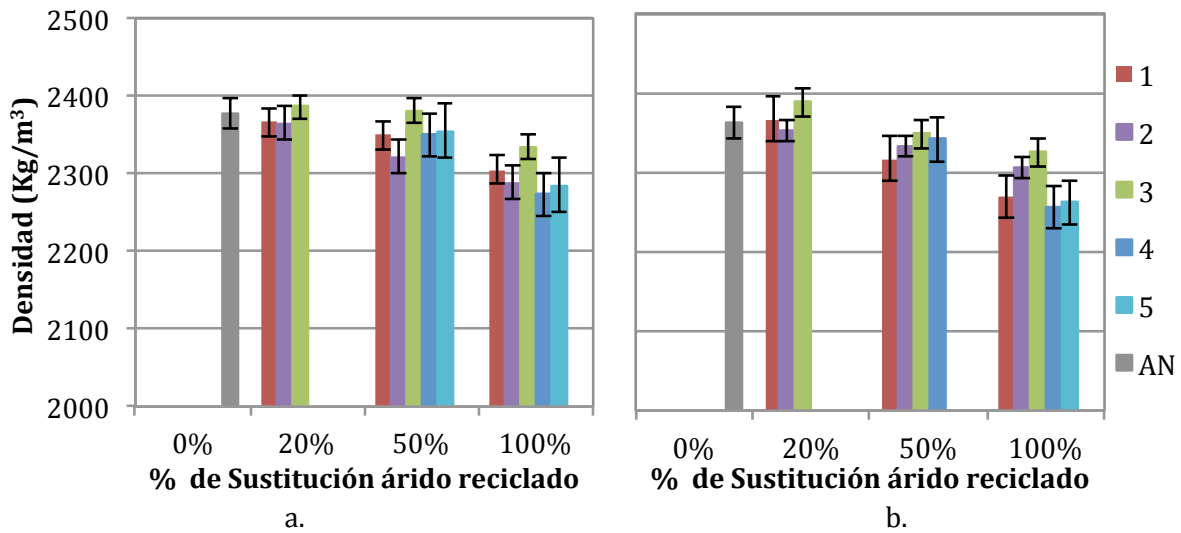


Figura 6.4. Valores de densidad para hormigones con distintos tipos de árido reciclado según el porcentaje de sustitución. a) hormigones con relación $a_{R10'}/c$ 0,45. b) hormigones con relación $a_{R10'}/c$ 0,55.

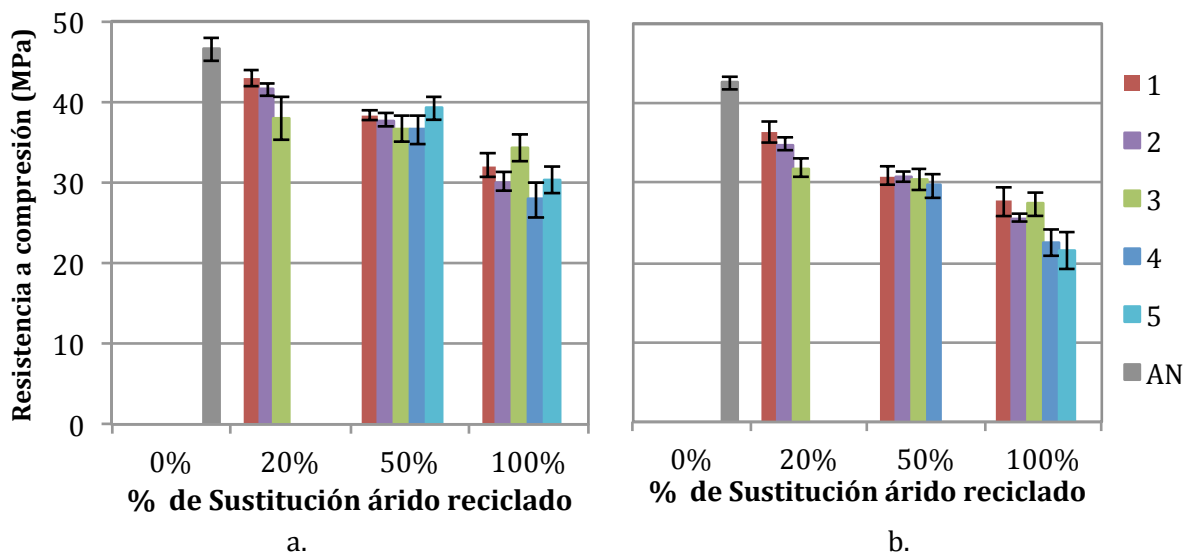


Figura 6.5. Resistencia a compresión a 7 días en hormigones con distintos tipos de árido reciclado. a) hormigones con relación $a_{R10'}/c$ 0,45. b) hormigones con relación $a_{R10'}/c$ 0,55.

Cuando se observan los valores de resistencia a compresión a 28 días para hormigones con sustituciones de 20%, 50% y 100% de árido reciclado (Figura 6.6), el rango en el que se mueven los resultados es más amplio, teniendo para el caso de relación a/c 0,45 valores entre 31,5 MPa y 50,7 MPa; mientras que para a/c 0,55 se presentan datos entre 26,6 MPa y 43,7 MPa.

En la Figura 6.5 y Figura 6.6 puede observarse, como tendencia generalizada, que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido reciclado, la resistencia tanto a 7 días como a 28 días se ve disminuida, en mayor o menor proporción según el tipo de árido reciclado empleado.

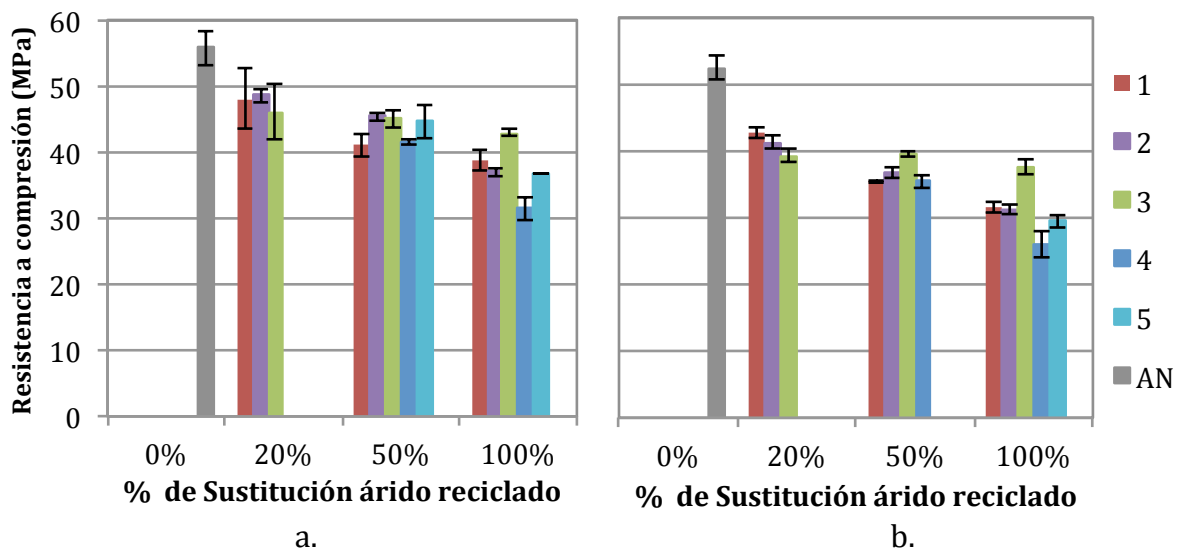


Figura 6.6. Resistencia a compresión a 28 días en hormigones con distintos tipos de árido reciclado. a) hormigones con relación a_{R10}/c 0,45. b) hormigones con relación a_{R10}/c 0,55.

Al utilizar el árido reciclado presaturado, la relación a_{tot}/c es mayor cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de árido natural por reciclado. Entendiendo como el agua total, la suma del agua añadida más el agua que pudieron absorber los áridos reciclados en el proceso de presaturación y como agua efectiva el agua total menos el agua que absorbieron los áridos (apartado 4.1.3. tabla 4.3). En la Figura 6.7 se presentan los gráficos de dispersión para los valores medios de resistencia a compresión a 28 días según la relación agua cemento total (a_{tot}/c) y efectiva (a_{ef}/c) del hormigón. De las ecuaciones obtenidas para la recta de regresión en cada caso se observa un mejor ajuste de los valores de resistencia cuando son evaluados respecto a la relación a_{tot}/c .

En la Figura 6.7.b. los valores con mayor relación a_{tot}/c corresponden a los hormigones con 100% de reciclado y los de menor valor de a_{tot}/c corresponden al 0% de sustitución. La línea de tendencia representa la mayor demanda de agua en hormigones con árido reciclado a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución. Efectivamente se ha encontrado que las mayores dispersiones en los

resultados se obtienen con sustituciones del 100% debido a la mayor absorción y heterogeneidad de los áridos reciclados. En general existen variaciones reflejadas en los resultados al cambiar el tipo de árido reciclado para todos los porcentajes de sustitución, siendo más o menos significativa según la relación a/c. Por lo tanto, el árido reciclado aumenta la sensibilidad de los resultados de resistencia a compresión del hormigón; la variabilidad se incrementa a medida que aumenta la relación a/c, que finalmente está directamente influenciada por el uso de áridos reciclados.

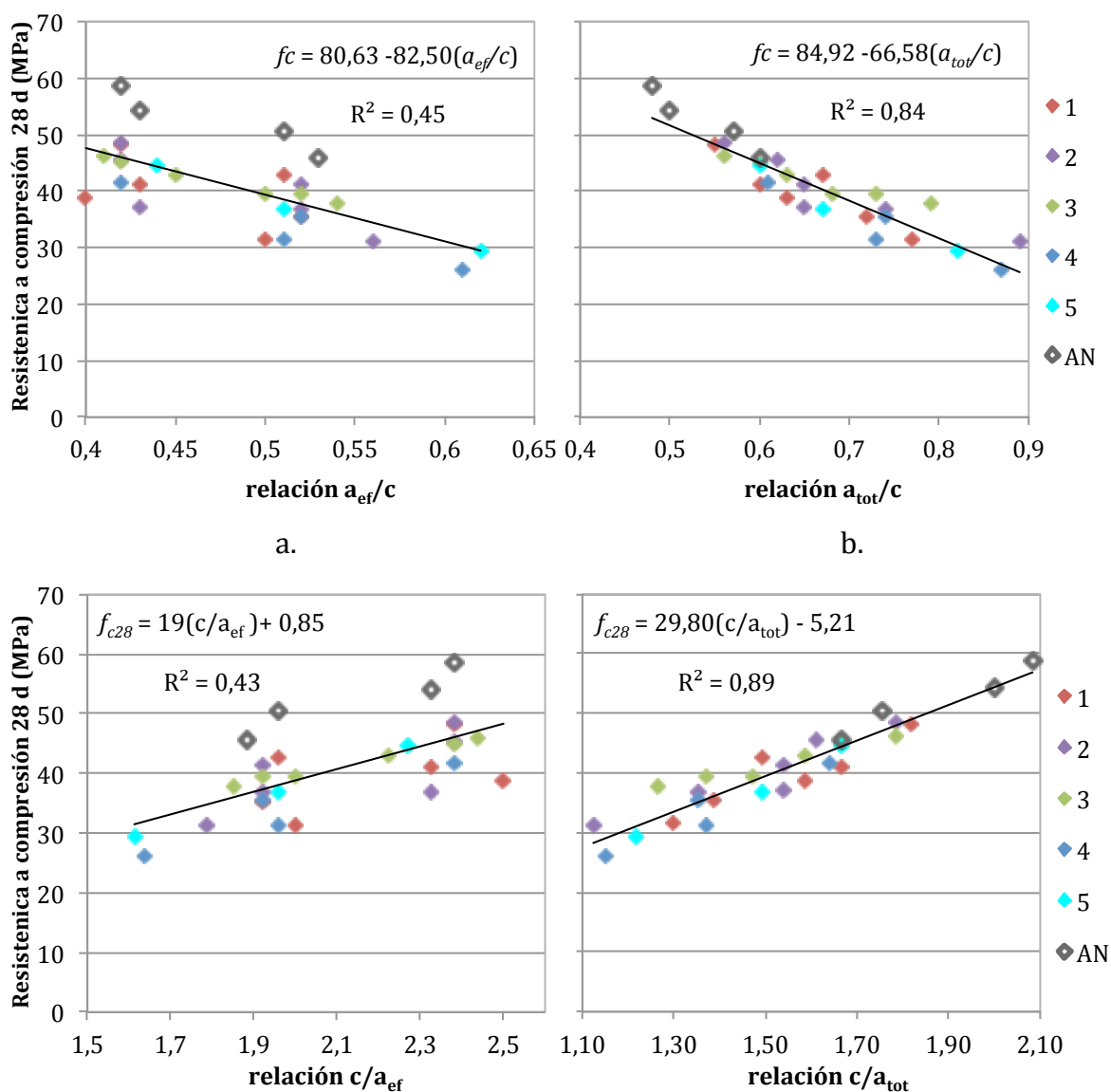


Figura 6.7. Relación de valores medios de Resistencia a compresión a 28 días en hormigones con diferentes tipos de árido reciclado respecto a la relación a/c y c/a. a) Para la relación a_{ef}/c . b) Para la relación a_{tot}/c .

En la Figura 6.8 se observa el comportamiento de la resistencia a compresión a 28 días para cada relación $a_{R10'}/c$ para hormigones con porcentajes de sustitución de árido reciclado diferente. Se presentan los valores de resistencia a compresión promedio de los hormigones analizados para cada porcentaje de sustitución y la desviación correspondiente de éstos.

Los resultados de todas las probetas de todos los hormigones con árido reciclado de hormigón de distinta procedencia para un porcentaje de sustitución determinado y una relación $a_{R10'}/c$ son utilizados para evaluar la variabilidad obtenida.

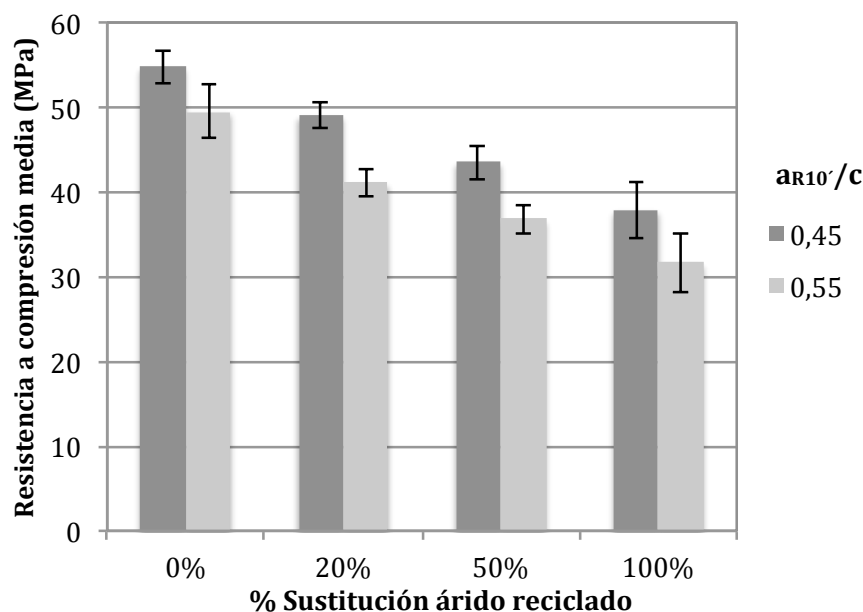


Figura 6.8. Resistencia a compresión promedio a 28 días de hormigones con distintos tipos de árido reciclado para diferentes porcentajes de sustitución.

Para el análisis de resultados, se evaluó el coeficiente de variación (CV) de la resistencia a compresión en los distintos hormigones. Se constata que la resistencia a compresión del hormigón se ve afectada por el porcentaje de sustitución de árido reciclado y por las características de éste. Al utilizar diferentes tipos de árido reciclado y evaluar su coeficiente de variación a edades diferentes, se obtiene un valor máximo de variación de 11,8% a 28 días sobre los resultados experimentales, como se observa en la Figura 6.9, para la situación más

desfavorable (mayor relación agua/cemento y sustitución total, 100% de árido reciclado grueso).

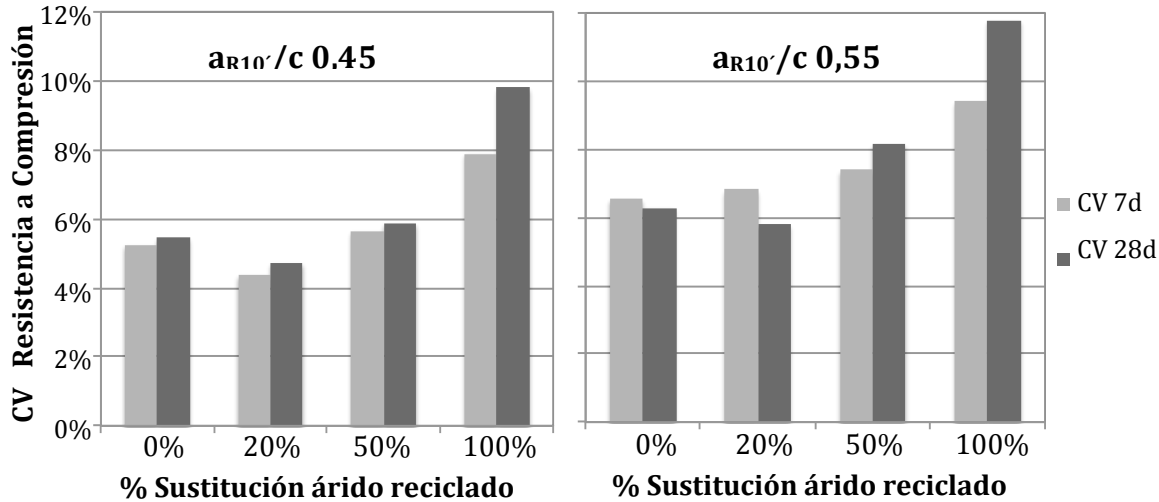


Figura 6.9. Coeficiente de variación del hormigón según el porcentaje de sustitución y la relación a/c para 7 días y 28 días.

Con porcentaje de sustitución de árido reciclado de hasta 50% la variabilidad de los resultados de resistencia a compresión es prácticamente igual a la encontrada para el caso de hormigón con árido natural o con 20% de sustitución y aunque aumenta para un porcentaje de sustitución de 100% de árido reciclado, el coeficiente de variación CV no alcanza el 12%, por lo que es considerado aceptable. El incremento en el coeficiente de variación puede indicar que el árido reciclado aumenta la sensibilidad de resistencia a compresión del hormigón; la cual también es mayor a medida que aumenta la relación a/c, que para este caso está directamente influenciada por el proceso de presaturación del árido reciclado.

Trabajar con distintos porcentajes de sustitución y distintos áridos tiene como consecuencia que la relación a_{ef}/c que tiene cada mezcla es distinta. Por lo que se referencia la relación $a_{R10'}/c$. En la Tabla 6.11 se presentan los valores de las relaciones a/c reales estimadas para cada caso y los valores medios de resistencia a compresión para cada hormigón. Los resultados son la media de 3 probetas cilíndricas.

Tabla 6.11. Resultados experimentales obtenidos.

Tipo de árido	a_{R10}/c	a_{ef}/c	a_{tot}/c	% sust	fc 28d (MPa)	Desv fc (MPa)
0	0,45	0,42	0,48	0	58,73	2,58
0	0,45	0,43	0,50	0	54,16	0,66
0	0,55	0,51	0,57	0	50,5	1,81
0	0,55	0,53	0,60	0	45,69	0,8
1	0,45	0,42	0,55	20	48,06	4,49
1	0,45	0,43	0,60	50	41,03	1,70
1	0,45	0,40	0,63	100	38,73	1,50
1	0,55	0,51	0,67	20	42,67	0,89
1	0,55	0,52	0,72	50	35,38	0,14
1	0,55	0,50	0,77	100	31,43	0,76
2	0,45	0,42	0,56	20	48,54	1,01
2	0,45	0,42	0,62	50	45,38	0,62
2	0,45	0,43	0,65	100	36,98	0,73
2	0,55	0,52	0,65	20	41,27	0,91
2	0,55	0,52	0,74	50	36,75	0,98
2	0,55	0,56	0,89	100	31,20	0,67
3	0,45	0,41	0,56	20	46,07	4,13
3	0,45	0,42	0,60	50	45,07	1,35
3	0,45	0,45	0,63	100	42,93	0,46
3	0,55	0,50	0,68	20	39,32	1,16
3	0,55	0,52	0,73	50	39,52	0,40
3	0,55	0,54	0,79	100	37,72	0,22
4	0,45	0,42	0,61	50	41,57	0,52
4	0,45	0,51	0,73	100	31,38	1,67
4	0,55	0,52	0,74	50	35,45	1,00
4	0,55	0,61	0,87	100	25,99	1,94
5	0,45	0,44	0,60	50	44,63	0,53
5	0,45	0,51	0,67	100	36,71	0,08
5	0,55	0,62	0,82	100	29,45	0,93

Donde 0: árido natural, 1: árido Madrid, 2: árido Obra VLC,
3: árido Moncofa, 4: árido Benicarló, 1: árido Murcia.

Por otro lado, es evidente que existe una correlación entre las propiedades del árido reciclado, es decir, entre la densidad, la absorción y la cantidad de mortero adherido, pero es interesante poder cuantificarla. Cuando se analiza la variabilidad entre los grupos sobre la resistencia a compresión, se hace evidente la gran significancia del porcentaje de sustitución de árido reciclado en el hormigón.

Las figuras que se presentan a continuación hacen referencia en muchos casos al análisis de variabilidad intragrupal e intergrupala. Variabilidad intragrupal, hace referencia al coeficiente de variación CV de la resistencia en un grupo de 3 probetas de la misma amasada para un hormigón, mientras que variabilidad intergrupala se refiere al coeficiente de variación entre grupos de 3 probetas para amasadas con diferente tipo de árido reciclado pero igual porcentaje de sustitución, es decir para el mismo tipo de hormigón.

La Figura 6.10 y Figura 6.11 presentan los valores del coeficiente de variación CV intragrupal, para el hormigón con los diferentes tipos de árido (áridos reciclados y árido natural), respecto a la resistencia a compresión a 7 y 28 días respectivamente. Puede observarse que los mayores coeficientes de variación son presentados por los hormigones con áridos reciclados 1 (Madrid) y 3 (Moncofa) en el caso de 7 días, aunque el árido de Murcia presenta también un CV intragrupal alto, es descartado por encontrarse fuera del cuartil. Para 28 días la variabilidad del árido identificado como 4 Benicarló es mayor y llega a influir hasta un 7,5% en la resistencia del hormigón. Tomando la Figura 6.10 como ejemplo, se aprecia que la resistencia a compresión del hormigón fabricado con el árido 2 (Obra VLC), presenta un bajo CV entre 3 probetas de una misma amasada, y varía poco de una amasada a otra (Figura 6.11), los puntos que le corresponden en la gráfica son muy cercanos. Sin embargo no ocurre lo mismo para el caso del árido 1 (Madrid), lo que puede ser debido al mayor contenido de asfalto que presenta su composición.

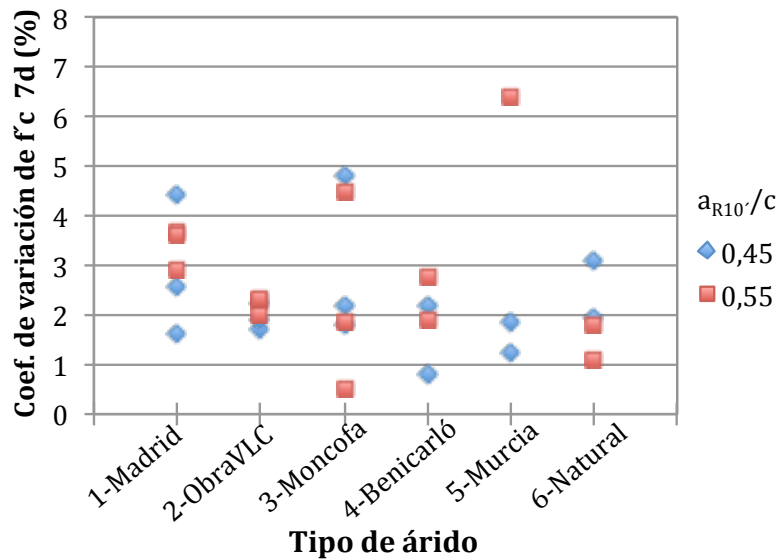


Figura 6.10. Coeficiente de variación para la Resistencia a compresión a 7 días en hormigones con diferentes tipos de árido reciclado.

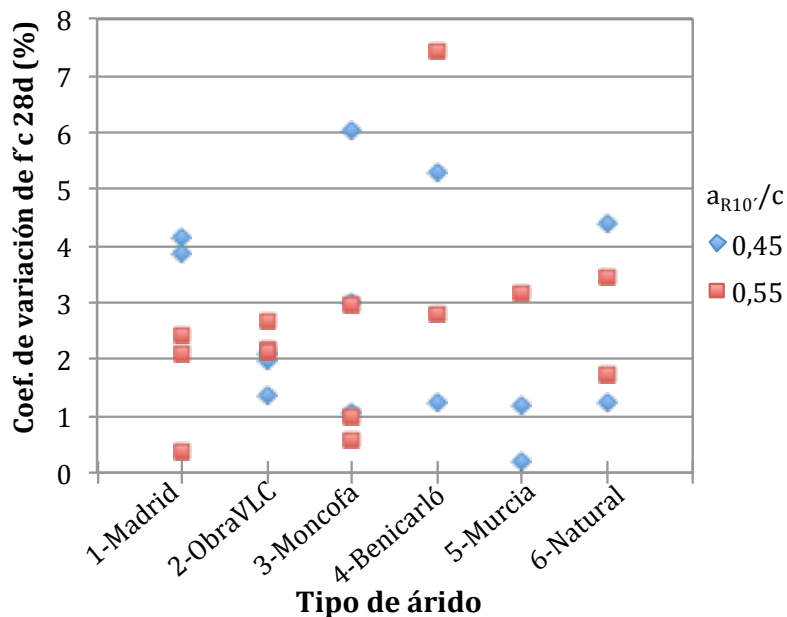


Figura 6.11. Coeficiente de variación para la Resistencia a compresión a 28 días en hormigones con diferentes tipos de árido reciclado.

Se presentan diagramas de Caja-Bigotes (boxplots o box and whiskers) como una forma de presentación visual de los coeficientes de variación que describe varias características importantes al mismo tiempo, como la dispersión y simetría.

Una gráfica de este tipo consiste en una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido entre los cuartiles, que señalan el valor mayor que el 25% y el que sobrepasa al 75% de los valores de la distribución ordenados de menor a mayor. La caja está dividida por un segmento vertical que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero. Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes. Estos bigotes tienen un límite de prolongación, de modo que cualquier dato que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente.

La Figura 6.12.a., permite observar en términos medios, que el CV intragrupal (puntos rojos) a 7 días para los hormigones con árido reciclado de 4-Benicarló, 3-Moncofa y 2-Obra VLC es similar al CV del hormigón con árido 6-natural. Para los áridos 1-Madrid y 5-Murcia, parece que el CV intragrupal tiende a ser un poco mayor que en el caso de árido natural, sin embargo al evaluarlo a 28 días (Figura 6.12.b.) estos valores se aproximan o incluso disminuyen respecto al hormigón con árido natural. En algunos casos como con el árido reciclado 5-Murcia, para estimar mejor la variabilidad intragrupal es necesario disponer de más datos, pero para el desarrollo de este trabajo no ha sido posible por las dificultades en la adquisición del árido reciclado. Es importante determinar si la falta de estabilidad del CV se debe a la escasez de datos o a la calidad del árido. De igual manera en el caso de Moncofa, estimar la variabilidad intragrupal requerirá la disposición de una mayor cantidad de datos, de más grupos. Se puede decir con certeza que la variabilidad entre los hormigones con distintos tipos de árido reciclado, puede verse influenciada tanto por los diferentes porcentajes de sustitución, como por las diferentes relaciones a/c.

Analizando gráficamente el efecto de la relación $a_{R10'}/c$ sobre la variabilidad intragrupal en la Figura 6.13 (posición de la media de CV en el diagrama, punto rojo) se encuentran valores de 2,1% y 2,4% para $a_{R10'}/c$ 0,45 y 0,55 respectivamente y la variabilidad intergrupala (ancho total de caja+bigotes). Se observa que no hay una diferencia significativa entre $a_{R10'}/c=0,45$ y $a_{R10'}/c=0,55$, aunque el coeficiente de variación intra e inter grupal es mayor para $a_{R10'}/c$ 0,55.

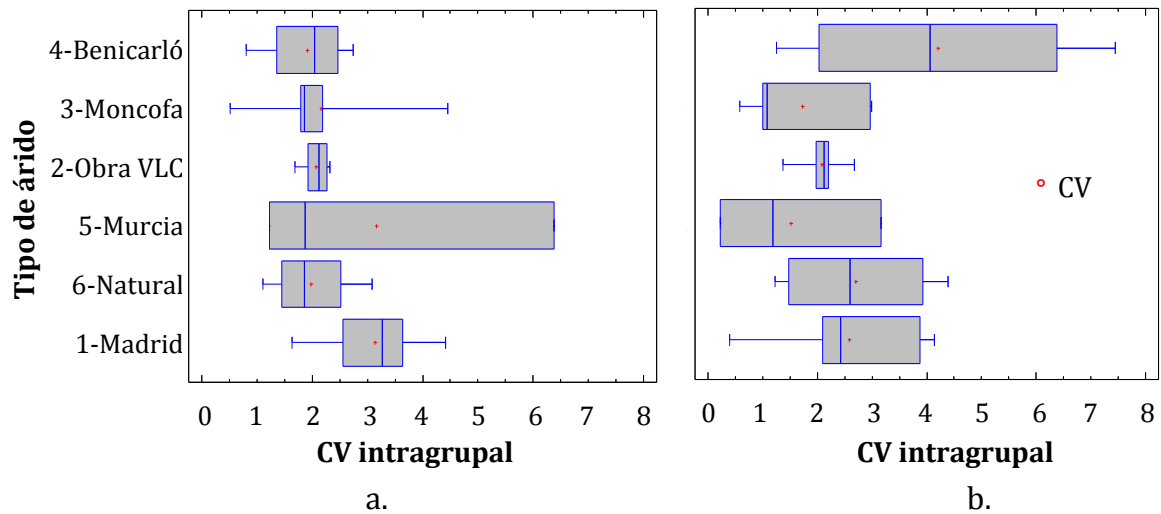


Figura 6.12. Coeficiente de variación intragrupal de la Resistencia a compresión en hormigones con diferentes tipos de árido reciclado. a) a 7 días. b) a 28 días.

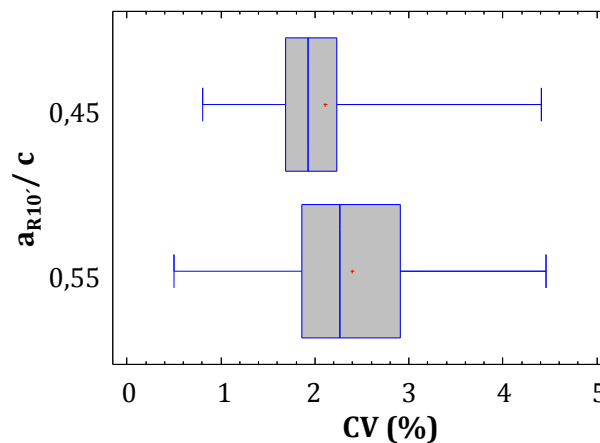


Figura 6.13. Análisis del coeficiente de variación de la resistencia a compresión para las distintas relaciones a_{R10}/c 0,45 y 0,55.

Se ha analizado el coeficiente de variación en función del porcentaje de sustitución evaluando la variabilidad intragrupal o valor esperado de CV en un grupo de 3 probetas. Se observó que no hay diferencias significativas de un porcentaje de sustitución a otro. Los puntos rojos representan el CV intragrupal promedio y se encuentran entre 2 para el 0% de sustitución y 2,8 para el 100% de árido reciclado (Figura 6.14). No obstante la variabilidad intergrupala presenta diferencias que

pueden aparecer de un grupo de 3 probetas frente a otros grupos de 3 probetas y es tanto mayor cuanto mayor ha sido el porcentaje de sustitución de árido reciclado (ancho).

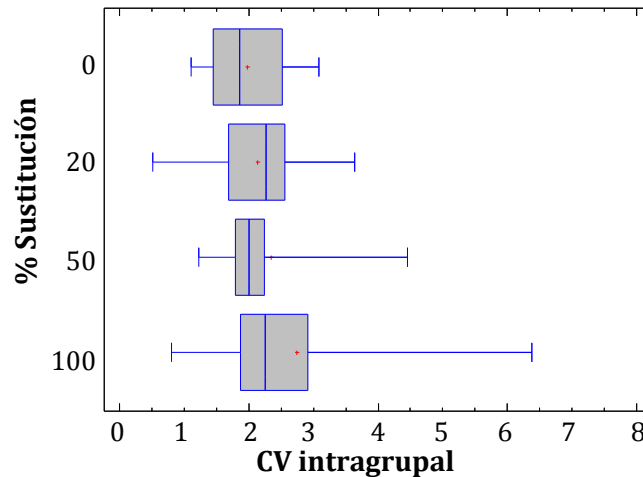


Figura 6.14. Análisis del coeficiente de variación intragrupal de la resistencia a compresión a 7 días según el porcentaje de sustitución de árido reciclado.

En la Figura 6.15 se presentan los valores de resistencia a compresión del hormigón a 28 días para las relaciones $a_{R10'}/c$ 0,45 y 0,55 respectivamente, según el tipo de árido empleado y se observa que el hormigón con árido reciclado 2-ObraVLC presenta una variabilidad intergrupala pequeña, es decir la separación de los puntos es muy parecida en todos los grupos de 3 probetas, sin embargo es evidente la influencia que tiene el porcentaje de árido reciclado y la relación $a_{R10'}/c$ en la resistencia a compresión, que oscila entre 30 y 50MPa. Para el árido 3-Moncofa, aunque en general se observa una mayor dispersión de los puntos entre grupos de tres probetas, la resistencia se encuentra se mueve en un rango menor, es decir varia menos en función del porcentaje de sustitución de árido reciclado entre 37 y 50 MPa.

Evidentemente las características del hormigón y l las propiedades del tipo de árido, van a afectar la resistencia a compresión del hormigón. Se realiza un estudio de regresión, con el fin de cuantificar la influencia de estos parámetros en la resistencia del hormigón.

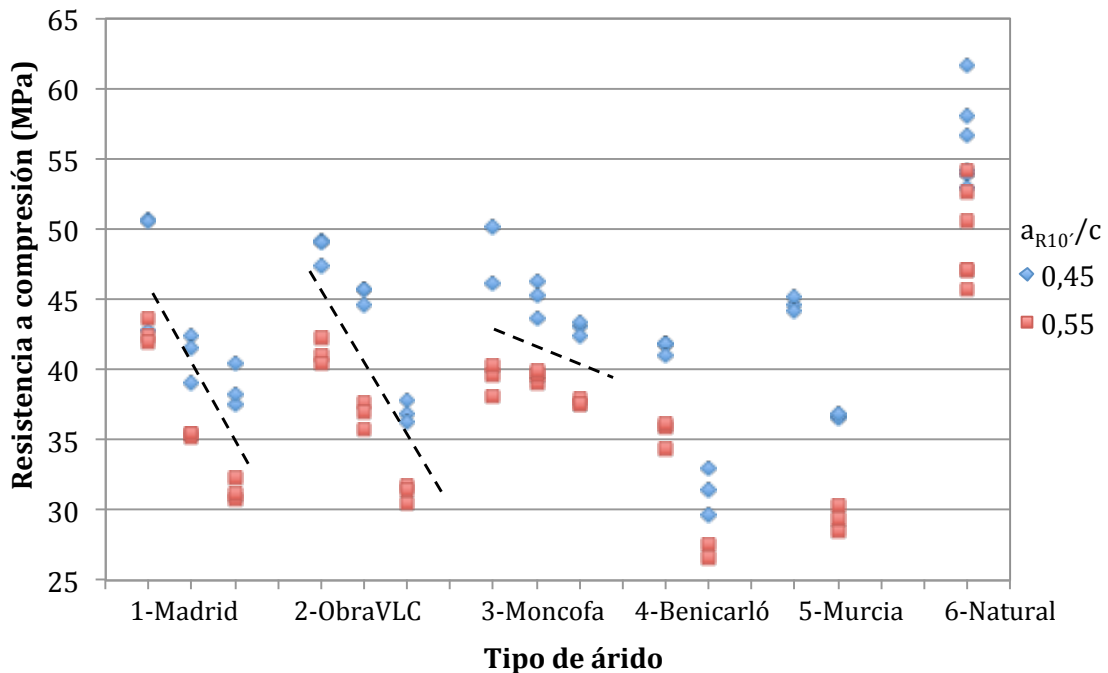


Figura 6.15. Resistencia a compresión a 28 días para hormigones con relación $a_{R10'}/c=0,45$ y $a_{R10'}/c=0,55$ y distintos tipos de árido reciclado.

6.2.2 Estudio de Regresión

Distintas variables intervienen en la resistencia a compresión simple del hormigón y por lo tanto se requiere utilizar más de una variable explicativa para realizar estimaciones más precisas.

Al tener más de una variable explicativa surgen algunas diferencias con el modelo de regresión lineal simple y es importante estimar cuáles de estas variables explicativas son las más influyentes en la variable dependiente (resistencia a compresión fc), por lo que se realiza un análisis de regresión lineal múltiple. Al igual que en regresión lineal simple, se considera que los valores de la variable dependiente (fc) han sido generados por una combinación lineal de los valores de una o más variables explicativas y un término aleatorio de la siguiente forma:

$$y = b + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 \dots + b_n \cdot x_n + u$$

Los coeficientes son elegidos de manera que la suma de cuadrados entre los valores observados y los pronosticados sea mínima, es decir, que se minimiza la varianza residual.

Inicialmente se busca una ecuación que evalúe la resistencia a compresión del hormigón según la relación a/c ($a_{R10'}/c$) y el porcentaje de sustitución para los áridos reciclados analizados. Donde K_1 es una constante según la edad del hormigón, mientras que los coeficientes K_2 y K_3 relacionan en la ecuación la influencia de $a_{R10'}/c$ y del porcentaje de sustitución de árido reciclado (%AR). El valor de K_4 corresponde al tipo de árido reciclado y la edad estudiada. Los coeficientes de la ecuación que multiplican los factores analizados son negativos, lo que significa que cambiar el árido natural por uno reciclado implica un descenso en la resistencia esperada, lo cual es lógico. Se observa, por ejemplo, que para evaluar la resistencia a 28 días al sustituir el árido natural por el árido reciclado 4-Benicarlo se genera un mayor descenso que si se sustituye el árido reciclado 1-Madrid.

$$f_c = k_1 - K_2 \cdot (\%AR) - K_3 \cdot (a_{R10'}/c) - K_4(\text{tipo de árido})$$

Valores de K_1 , K_2 y K_3			Valores de K_4		
K	7 días	28 días	Tipo de árido	7 días	28 días
K_1	76,93	86,4	1-Madrid	2,02	6,78
K_2	0,117	0,115	2-ObraVLC	3,33	6,31
K_3	67,09	67,05	3-Moncofa	3,19	4,12
R^2	93,29%	90,90%	4-Benicarlo	5,47	10,61
			5-Murcia	4,42	7,44

Se observa que los términos que multiplican al porcentaje de sustitución (%AR) y a la relación $a_{R10'}/c$ tanto a 7 días como a 28 días son prácticamente iguales, por lo que el efecto de estas variables sobre la resistencia no cambia significativamente con el tiempo. No obstante cuando se habla del tipo de árido reciclado, no ocurre igual, a 28 días el tipo de árido reciclado presenta mayor influencia en la resistencia a compresión que a 7 días.

En la búsqueda de una ecuación más general que contemple las propiedades del árido, de manera que pueda ser aplicada para distintos tipos de árido reciclado de los que se conozcan sus propiedades se realizó un análisis por regresión lineal múltiple y ANOVA.

Para constituir un modelo mediante la técnica de regresión lineal múltiple sobre los valores de resistencia promedio de las tres probetas producidas a partir de cada una de las amasadas (Tabla 6.11), fueron analizadas las variables que intervienen en la resistencia a compresión de hormigones con árido reciclado, según las propiedades y composición de los áridos, además de las características del hormigón (relación a/c y % de sustitución).

Se consideran como variables referidas al hormigón:

- Relación a_{ef}/c
- Porcentaje de sustitución de árido grueso reciclado

Y como variables referidas a los áridos reciclados:

- Propiedades físicas
- Componentes (Tabla 6.5)
- Densidad
- Capacidad de absorción
- Coeficiente de los ángeles LA
- Ra (asfalto)
- Rb (cerámicos)
- Rc (hormigón)
- Ru (áridos)
- R otros (vidrio, madera, metal,)

El análisis de estas variables está justificado ya que los factores clave que afectan la resistencia a compresión del hormigón con áridos reciclados son el porcentaje de sustitución (Lopez-Garrarre et al, 2009) y las características de éstos, especialmente su capacidad de absorción (Etxeberria *et ál.*, 2007; Yang *et ál.*, 2008), y el coeficiente de los ángeles (Tabsh and Abdelfatah 2009). La influencia del estado de humedad de los áridos repercute directamente en la relación a/c, la cual es determinante en la resistencia a compresión en hormigones con árido reciclado (Ulloa, *et ál.* 2011, Pelufo *et ál.*, 2009).

Evidentemente existe una fuerte correlación en las propiedades consideradas, como la existente entre la densidad y la capacidad de absorción o entre éstas y la cantidad de mortero adherido, pero se discriminan para determinar el efecto de estas propiedades sobre el hormigón. Se evaluó la matriz de correlaciones para descartar variables redundantes y se encontró que la variable Rc (hormigón) está fuertemente relacionada con la densidad y la absorción y que la variable LA (coeficiente de los ángeles) se relaciona con Rb (cerámicos) y se decide fijar estas como variables explicativas del árido reciclado.

Se ha encontrado que un mayor valor de coeficiente de los ángeles incrementa la variación que puede producirse en los resultados dentro de un mismo grupo, mientras que respecto a la composición del árido reciclado, cuando aumenta la cantidad de áridos de hormigón y pétreos (Rc+Ru) se observa una disminución de la varianza dentro del grupo. La presencia significativa de elementos contaminantes en el árido reciclado tiende también a aumentar la variabilidad de la resistencia a compresión del hormigón entre amasadas.

Se fijan entonces como variables explicativas a considerar en el estudio de regresión:

%AR :Porcentaje de sustitución de árido reciclado

a_{ef}/c Relación agua efectiva / cemento

LA: Coeficiente de los ángeles

Rc: Porcentaje de productos de hormigón y mortero

Rb Porcentaje de compuestos de albañilería

Se siguió el procedimiento de regresión *stepwise* o construcción /simplificación (Draper & Smith, 1981) para determinar la resistencia a compresión a 28 días del hormigón con árido reciclado, según la ecuación genérica:

$$f_{c28} = b_o + (b_1 \cdot LA + b_2 \cdot Rb_{0,1}) \cdot \frac{a_{ef}}{c} + (b_3 + b_4 \cdot Rb_{0,1} + b_5 \cdot Rc) \cdot \%AR$$

La ecuación involucra dentro de las propiedades del hormigón la relación a_{ef}/c y el porcentaje de sustitución de árido reciclado (%AR) y dentro de las propiedades del árido reciclado el coeficiente de los ángeles (LA) y sus características en componentes cerámicos (Rb) y de hormigón (Rc).

Se presentan los coeficientes para ajustarse al modelo que explica la resistencia media del hormigón a compresión simple en función de las distintas variables:

Coeficiente	Valor ajustado
b_0	73,7943
b_1	-1,94207
b_2	-8,0029
b_3	-0,519018
b_4	0,140945
b_5	0,00579871

El efecto en la sustitución parcial o total de áridos reciclados en la resistencia a compresión del hormigón depende del tipo y procedencia de éste, es decir de su composición y características particulares. El uso de áridos reciclados hace al hormigón más susceptible al proceso de fabricación e incrementa la importancia del momento en el que se añade el agua en la mezcla (áridos reciclados en estado saturado o seco). La cantidad de agua total en la mezcla, se refleja evidentemente en los valores de resistencia a compresión y en general en todas las propiedades del hormigón.

En el artículo 28.6.1 del anejo 15 de la EHE-08 se limita el valor de la absorción de los áridos reciclados para uso en hormigón estructural a una cantidad menor de 7%. Este es un valor fácil de cumplir para los áridos reciclados de hormigón producidos actualmente en España y con posibilidad de disminuir debido a la optimización de los procesos de producción que pueden ejecutarse en las plantas de gestión de residuos.

6.3 Evaluación de la influencia del estado de humedad de los áridos a introducir en la mezcla

Se ha realizado una evaluación del comportamiento del hormigón cuando los áridos son introducidos en la mezcla en diferentes estados de humedad, teniendo en cuenta que propiedades como su mayor absorción influyen significativamente en el producto final.

Hormigones con porcentajes de sustitución de 20%, 50% y 100% de árido grueso natural por árido grueso reciclado de hormigón, son fabricados y comparados con un hormigón de referencia solo con árido natural. Se analizan sus características físicas de consistencia y densidad y mecánicas como la resistencia a compresión.

Teniendo en cuenta que el agua de amasado juega un doble papel en el hormigón, ya que participa en las reacciones de hidratación del cemento y permite la trabajabilidad adecuada para su puesta en obra (Jiménez *et ál.*, 2001), se evalúa qué cantidad de agua realmente se encuentra actuando en la mezcla de hormigón, para analizar objetivamente sus propiedades.

El mejor ajuste granulométrico se obtiene utilizando el método de (Bolomey 1935). La densidad del árido reciclado ha sido contemplada en la dosificación y la sustitución de los porcentajes de árido reciclado evaluados se hace por ajuste granulométrico en volumen. El ajuste de las dosificaciones siempre debe ser de acuerdo a la granulometría de los áridos utilizados, ya que una sustitución simple del porcentaje de árido grueso natural por árido grueso reciclado puede influir negativamente en las propiedades del hormigón.

6.3.1 Planteamiento de los ensayos

Teniendo en cuenta la dificultad de garantizar un nivel de humedad determinado y constante en los áridos de acuerdo a las condiciones normales en obra, se ha planteado un programa de ensayos con la finalidad de analizar la influencia del estado de humedad de los áridos al ser introducidos en el proceso de fabricación sobre las propiedades del hormigón.

Se suele admitir que las propiedades del hormigón depende de la cantidad de agua efectiva que es utilizada en su fabricación. Para ellos se supone que los áridos llegan a estar en condiciones de saturado superficie seca. Sin embargo, cuando los áridos se suministran secos durante el amasado y mientras el hormigón está en estado fresco no llegan a saturarse completamente. En estos casos el agua que se queda fuera de los áridos sería más de la inicialmente prevista.

En este apartado se ha trabajado sobre la dosificación base que se fabrica manteniendo fijas las cantidades de los componentes sólidos y del aditivo. Por lo tanto la variable del estudio será el estado de humedad de los áridos y las correcciones realizadas sobre el agua añadida. En la tabla 4.3. del planteamiento experimental se indican las condiciones impuestas para cada estado E y el valor del agua efectiva y agua total correspondientes, que evidentemente serán diferentes según el caso.

Se analizaron condiciones definidas como:

- E1 Agua total 171 Lt y áridos con humedad natural
- E2 Todos los áridos gruesos presaturados
- E3 Áridos reciclados presaturados
- E4 Agua efectiva 171 y áridos con humedad natural

Sobre estos hormigones se analiza el efecto que tiene el estado de humedad en que se encuentran los áridos al ser incorporados en la mezcla sobre la resistencia a compresión del hormigón. La validez de este estudio se consolida, al tener en cuenta la realidad en la producción del hormigón.

6.3.2 Dosificación de los hormigones

Para este apartado se han utilizado los áridos naturales de soinval y un árido grueso reciclado de denominación (1) Madrid, caracterizados en el apartado 6.1.2 y 6.1.3 respectivamente.

Se ha fabricado hormigón con 20%, 50% y 100% de sustitución de la fracción gruesa de árido natural por árido reciclado, mientras que para la fracción fina, fue

utilizada arena machacada natural para todos los casos. Un hormigón fabricado solo con áridos naturales es tomado como referencia 0%.

Para la fabricación de todos los hormigones a lo largo del desarrollo de esta tesis doctoral se ha seguido el procedimiento de la norma ASTM-C192, 2007 detallado en el apartado 5.2. Los hormigones se fabrican para cuatro condiciones de humedad de los áridos gruesos a_n/c 0,45 (apartado 4.1.3, tabla 4.3.). En la primera (E1), se introducen todos los áridos en su estado natural; en la segunda (E2), todos los áridos gruesos fueron incorporados después de 10 minutos sumergidos en agua y 10 minutos escurriendo, buscando un árido en condiciones de saturado superficie seca, y de igual manera para la tercera condición (E3), aunque en este caso se realizó la presaturación únicamente de los áridos reciclados. Por último, en la cuarta condición (E4) todos los áridos con su humedad natural, son incorporados a la mezcla, teniendo en cuenta la absorción de los mismos en la cantidad de agua total a añadir. Cuando se introducen los áridos gruesos y la primera parte del agua en la mezcla, se dan dos vueltas a la hormigonera y se dejan en reposo por 30seg.

Las dosificaciones fueron establecidas de forma similar a lo indicado en 6.2, buscando una misma consistencia (fluida), para lo que fue necesario el uso de aditivo superplastificante. Se buscaba obtener una resistencia a compresión del hormigón de 40MPa a 28 días, manteniendo constante una cantidad de cemento de 380Kg/m³ para todos los casos. Se realizó la dosificación teniendo en cuenta la granulometría de los áridos, su densidad y las condiciones de trabajabilidad deseadas. En el ajuste a la curva de Bolomey (1935), (Fernández 2004), fueron tomados como valores característicos $a=13$ y $D= 20$ y valoradas las distintas densidades de los materiales. Este hecho es importante si se tiene en cuenta la menor densidad de los áridos reciclados frente a los naturales. La dosificación se realiza por volumen, no por peso, debido a esa menor densidad que presentan los materiales reciclados. Como resultado de los ajustes se han obtenido las curvas granulométricas que se muestran en la Figura 6.16 y las cantidades de materiales se presentan en la Tabla 6.12. El ajuste de la dosificación se verificó mediante amasadas de prueba.

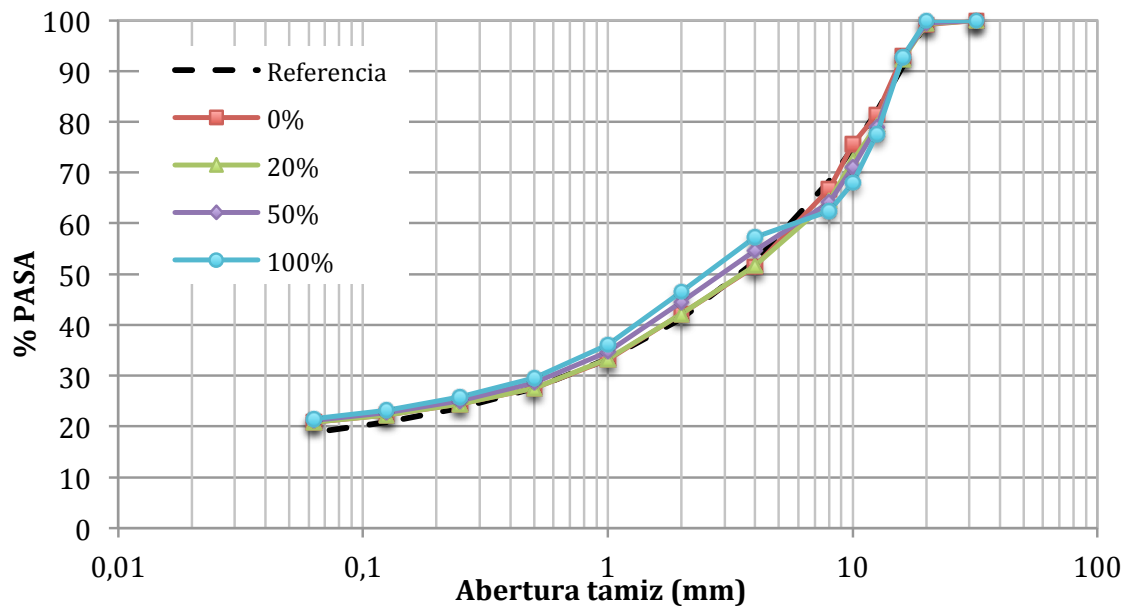


Figura 6.16. Ajuste de curvas granulométricas de hormigones con 0,45 de relación agua/cemento.

Tabla 6.12. Cantidad de materiales por metro cubico para hormigones con diferentes porcentajes de sustitución de árido reciclado.

Materiales	Cantidades en Kg/m ³			
	0%	20%	50%	100%
Agua	171	171	171	171
cemento	380	380	380	380
Arena	818,1	818,5	862,4	934,1
Gravilla	551,6	431,5	251,1	0,0
Grava	523,3	409,4	238,2	0,0
Reciclado		210,2	489,3	864,7
Aditivo *(%)	1%	1,2%	1,5%	1,7%
Σ peso materiales	2444,1	2420,7	2392,1	2349,8

*La cantidad de aditivo se toma como un porcentaje sobre la cantidad de cemento.

Debido al particular interés sobre la absorción, cuyo valor para los áridos reciclados es normalmente superior al de los áridos naturales, la necesidad de un nivel de control intenso sobre la humedad de los áridos reciclados, está más que justificada. Es evidente que la humedad y la absorción son variables fundamentales

en el diseño de las dosificaciones (relación agua/cemento) del hormigón con árido reciclado por su efecto directo frente a propiedades mecánicas.

6.3.3 Evaluación del comportamiento de los hormigones reciclados según las condiciones E1, E2, E3 y E4.

Se evaluó la trabajabilidad en estado fresco de todos los hormigones, por medio del cono de abrams siguiendo la norma UNE EN 12350-2:2009. En estado endurecido fue determinada la resistencia a compresión según la norma UNE-EN 12390-3, 2009 a 7 y 28 días. Las probetas fueron curadas en cámara húmeda hasta el momento de ensayo, procediéndose previamente al refrentado de la cara superior de la probeta según la norma UNE EN 12390:2009. Para cada mezcla, se ensayaron hasta rotura 4 probetas cilíndricas de 150x300mm.

Como consecuencia de las variables analizadas en la fabricación de los hormigones y la forma en que el agua que implica a los áridos ha sido introducida a la mezcla, la relación a_{ef}/c y a_{tot}/c que realmente actúan en cada caso es diferentes. En la Tabla 6.13 se presentan los valores de la relación a_{ef}/c y a_{tot}/c para los diferentes estados analizados.

Tabla 6.13. Valores de a_{ef}/c y a_{tot}/c para los distintos casos y hormigones.

Condición de ejecución	a_{ef}/c				a_{tot}/c			
	0%	20%	50%	100%	0%	20%	50%	100%
E1	0,41	0,40	0,38	0,36	0,45	0,45	0,45	0,45
E2	0,46	0,46	0,47	0,49	0,54	0,56	0,58	0,62
E3	0,44	0,44	0,45	0,50	0,49	0,51	0,54	0,64
E4	0,45	0,45	0,45	0,45	0,47	0,54	0,56	0,58

Respecto a la consistencia de los hormigones, los valores obtenidos son presentados en la Figura 6.17 y dan una idea de la trabajabilidad del hormigón en los distintos casos. Cuando los áridos reciclados son introducidos presaturados en

las condiciones utilizadas en este programa, la humedad real supera a la absorción y por tanto los áridos aportan más agua de la inicialmente prevista. Además este exceso se aporta como agua adherida a la superficie del árido, que implica mayores valores de consistencia a medida que aumenta el árido reciclado en el hormigón.

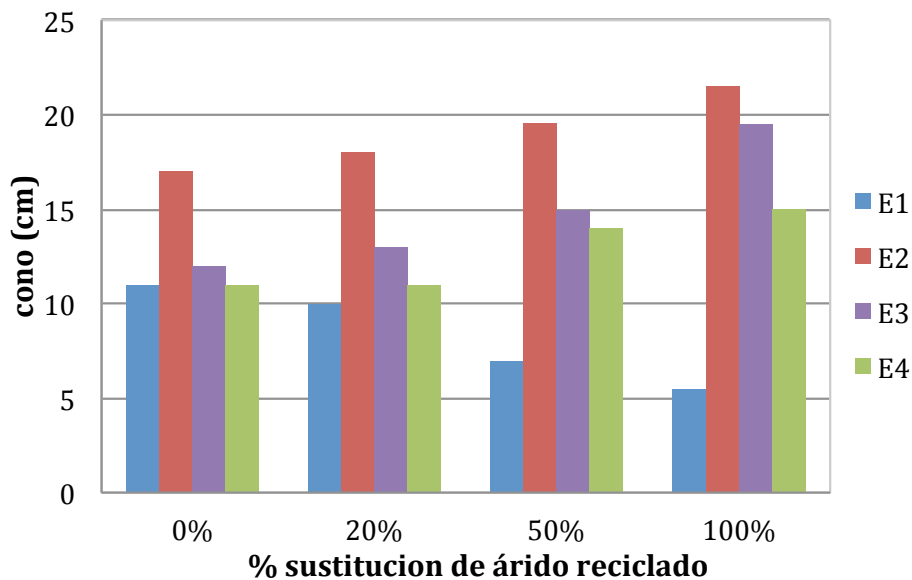


Figura 6.17. Valores de Consistencia de hormigones según el porcentaje de sustitución de árido reciclado y el estado de humedad en que son introducidos en la mezcla.

Para E1 se obtuvo un hormigón de consistencia más seca a medida que se aumentaba el porcentaje de árido reciclado en la mezcla, a pesar de que se corrigió con una mayor cantidad de aditivo. Para los casos E2 y E3 los valores de asentamiento tienden a aumentar para valores de sustitución de árido reciclado a partir de 50%. Para el caso E4 fueron obtenidos los valores más cercanos a la consistencia proyectada, siendo ésta ligeramente mayor a medida que se sustituye un mayor porcentaje de árido reciclado.

Al evaluar la densidad, los valores evidentemente tienden a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado en el hormigón (Figura 6.18) por la menor densidad de éste. Los hormigones para los que la relación a/c es mayor (E2 y E3) muestran asimismo una menor densidad. La desviación de los resultados de densidad es ligeramente mayor a medida que se incrementa el árido reciclado en el hormigón, aunque evidentemente a una tasa muy baja. La cantidad de agua en la

mezcla también introduce mayor variabilidad por lo que se encuentran mayor variabilidad en los resultados correspondientes a E2.

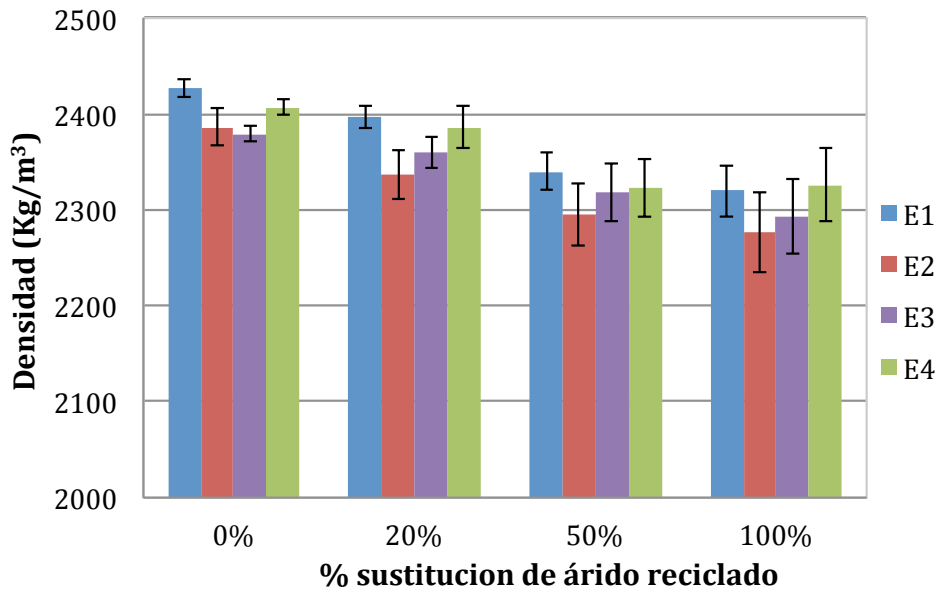


Figura 6.18. Densidad de hormigones para los porcentajes de sustitución establecidos y los distintos estados evaluados.

Se presentan en la Figura 6.19 los resultados de resistencia a compresión a 28 días de los hormigones estudiados. Según el estado en que son introducidos a la mezcla, la relación a/c cambia y por lo tanto la resistencia a compresión. Evidentemente cuando la relación a_{ef}/c es menor, la resistencia a compresión es mayor, por lo que para el caso E1 se obtienen altos valores de resistencia para hormigones con 50% y 100% de sustitución de árido reciclado, ya que corresponden a valores de a_{ef}/c de 0,38 y 0,36 respectivamente, los más bajos de toda la muestra estudiada. Según cada condición (E1, E2, E3 y E4) se observó una tendencia, siendo indiscutiblemente influyente la cantidad de árido reciclado, debido a que la cantidad de mortero adherido a éste genera zonas de interface débiles de baja densidad, que si además tienen un mayor contenido de agua en su superficie, puede traducirse en un menor desarrollo de la resistencia a compresión, de acuerdo con (Barra & Vázquez, 1998) y es el fenómeno que se presenta en los casos E2 y E3.

La resistencia a compresión para hormigones con 100% de árido reciclado, se ve afectada por un descenso del 15%, 24% y 10% para hormigones en estados E2, E3

y E4 respectivamente, frente al hormigón de control con árido natural correspondiente. Mientras que en el caso de E1 la resistencia mejora hasta un 11%.

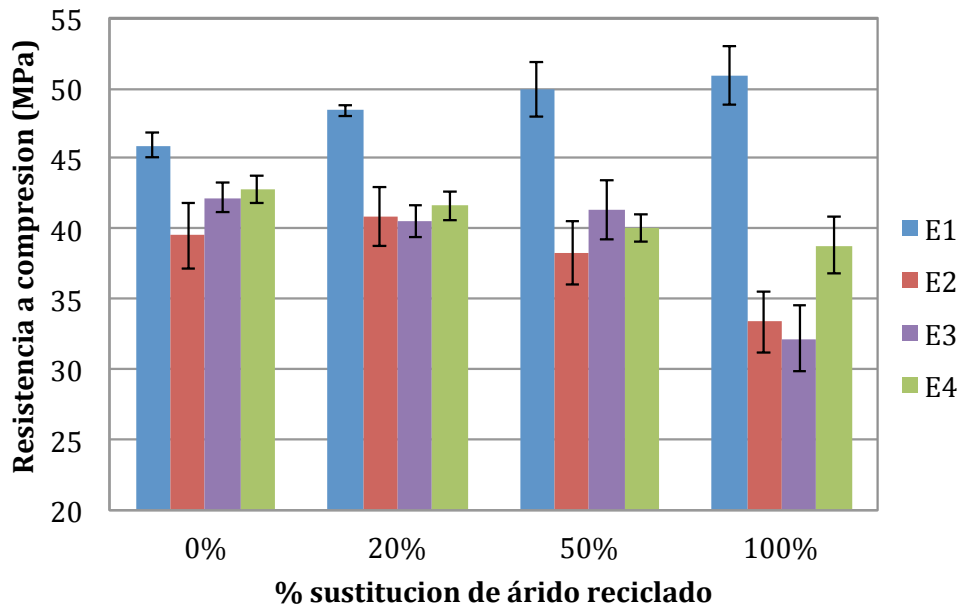


Figura 6.19. Resistencia a compresión a 28 días en hormigones con árido reciclado bajo distintas condiciones de humedad en la mezcla.

La desviación de los resultados de resistencia a compresión es mayor a medida aumenta la cantidad de árido reciclado en el hormigón y cuanto más agua total este presente. Así el coeficiente de variación para un hormigón con 20% de árido reciclado y en condición E1 es 0,9% mientras que aumenta hasta 7,4% para hormigones con 100% de árido reciclado fabricados bajo la condición E3. La cantidad de agua en la mezcla introduce mayor variabilidad su control es preciso.

Después del análisis realizado, se puede decir que el estado de humedad en el que son introducidos los áridos a la mezcla influye en la trabajabilidad del hormigón y en sus propiedades mecánicas, por lo que es indispensable definir como se introduce el árido reciclado a la mezcla.

En la Figura 6.20 se observa la relación entre la resistencia a compresión a 28 días y la relación a_{tot}/c y a_{ef}/c donde claramente la mayor cantidad de agua total en el

hormigón está relacionada con el porcentaje de sustitución de árido reciclado y con la caída de la resistencia, excepto para el caso E1, donde se forzó el mantenimiento de la misma cantidad de agua total a medida que se aumenta la cantidad de árido reciclado, por lo que se consigue un incremento en la resistencia a compresión, para una misma relación a_{tot}/c , pero con una disminución en la trabajabilidad.

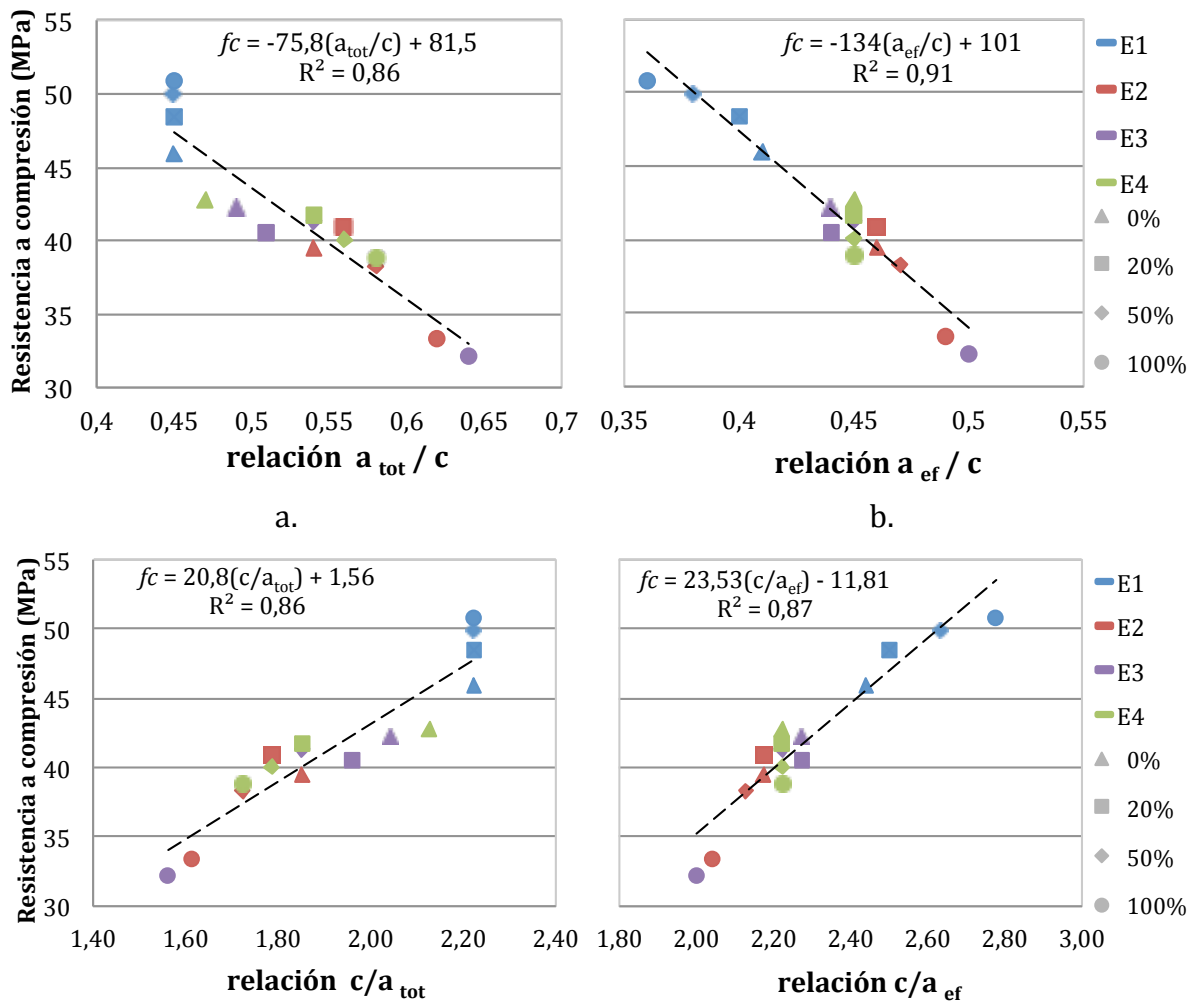


Figura 6.20. Resistencia a compresión a 28 días en hormigones con árido reciclado en distintas condiciones de humedad respecto a la relación a/c y c/a , según la relación agua cemento total o efectiva (a_{tot}/c o a_{ef}/c). a) Para la relación a_{tot} . b) Para la relación a_{ef} .

En términos generales, se encontró, que si los áridos reciclados son introducidos a la mezcla en estado natural, con un control sobre su humedad, y añadiendo al agua de amasado, la cantidad prevista que absorberán los áridos reciclados (E4) bajo un procedimiento de amasado adecuado, los resultados de los hormigones son

satisfactorios en estado fresco y en estado endurecido y no se genera un proceso extra en su producción a nivel industrial que puede convertirse en una limitante si se exige un estado presaturado a este producto.

La fabricación de los hormigones, en el desarrollo de esta tesis doctoral, para evaluar la durabilidad de hormigones expuestos a un ambiente marino, se realizó con las siguientes condiciones:

- En el agua añadida está cuantificada el agua de absorción de los áridos reciclados, controlando el contenido de humedad, para las respectivas correcciones.
- Los áridos se introducen al hormigón en estado natural (tanto los naturales como los reciclados)
- El proceso de mezcla se realiza añadiendo el agua en dos etapas, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 5.2.

Capítulo 7

Caracterización de los hormigones

Los componentes de un buen hormigón son muy simples: cemento, arena, áridos, agua y según las necesidades, aditivos y adiciones minerales. Sin embargo, los componentes de un hormigón malo son los mismos, la diferencia radica en el saber hacer (Neville, 1996).

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones que se utilizaron para el estudio de la durabilidad. Estos datos permiten evaluar la calidad de los hormigones estudiados, por medio del análisis de sus propiedades mecánicas contribuyendo así al conocimiento del hormigón con árido reciclado.

En estado fresco únicamente se evalúa la trabajabilidad, buscando ajustar la misma para todos, mientras que en estado endurecido, propiedades como densidad, resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de elasticidad son analizadas.

7.1 Propiedades físico mecánicas del hormigón

En la Tabla 7.1 se presentan las dosificaciones de los materiales para los hormigones estudiados en adelante, con relaciones a_{ef}/c 0,45 y 0,50, y porcentajes de sustitución de árido reciclado 0%, 20%, 50% y 100%.

Tabla 7.1. Dosificación de los hormigones estudiados.

a_{ef}/c	% Sust.	Cantidad de materiales (Kg/m ³)						a_{tot}/c
		Agua	Cemento	A 0/4	G 7/12	G 12/20	ArH4/20	
0,45	0%	171	380	818,1	551,6	523,3	-	0,52
	20%	171	380	818,5	431,5	409,4	210,2	0,54
	50%	171	380	862,4	251,1	238,2	489,3	0,57
	100%	171	380	934,1	-	-	864,7	0,60
0,50	0%	165	330	804,6	573,1	472,7	-	0,58
	20%	165	330	812,3	451,3	372,2	205,9	0,60
	50%	165	330	874,1	260,7	215,0	475,7	0,63
	100%	165	330	975,4	-	-	827,6	0,67

7.1.1 Consistencia

Para la fabricación del hormigón, todos los áridos fueron introducidos en estado natural, controlando periódicamente su humedad para establecer la cantidad de agua a añadir en la mezcla, en función del a_{ef}/c (0,45 o 0,50) y la absorción de los distintos áridos. Para obtener una consistencia blanda (6-9 cm), se realizan amasadas de prueba para los hormigones estudiados, ajustando la cantidad de aditivo necesaria respecto a la cantidad de cemento (Tabla 7.2). A medida que aumenta el contenido de áridos reciclados en la mezcla, una mayor cantidad de aditivo es requerida, a pesar de que la mayor absorción de los áridos reciclados se compensa al mantener el agua efectiva constante y aportar el agua necesaria para saturar los áridos. La generación de finos durante el amasado, a causa de la trituración de los áridos reciclados, reduce ligeramente la trabajabilidad del hormigón. En general se ha alcanzado la consistencia deseada para todos los hormigones. Aunque respecto a esta propiedad no existe una tendencia

generalizada, los resultados obtenidos presentan una tendencia similar a (Kou S. P., 2007).

Tabla 7.2. Valor del cono para los hormigones estudiados con la cantidad de aditivo utilizada.

a_{ef}/c	Hormigón % árido reciclado	% aditivo	Valor del cono (cm)
0,45	0	0,7	6,6
	20	0,7	7,2
	50	1,2	8,5
	100	1,5	9,1
0,50	0	0,7	7,2
	20	0,7	8,6
	50	1,2	9,9
	100	1,2	10,6

En la Figura 7.1 se presentan los valores medios y la dispersión de resultados del ensayo de asentamiento (UNE-EN_12350-2, 2009) obtenidos para los distintos hormigones fabricados. Se observa una relación entre la consistencia y la relación a_{ef}/c , así los hormigones con mayor relación a_{ef}/c 0,50, presentan un valor de cono de Abrams ligeramente mayor. Sin embargo estas diferencias no son significativas debido al pequeño rango en el que oscilan las relaciones a/c propuestas y los ajustes realizados con la cantidad de aditivo.

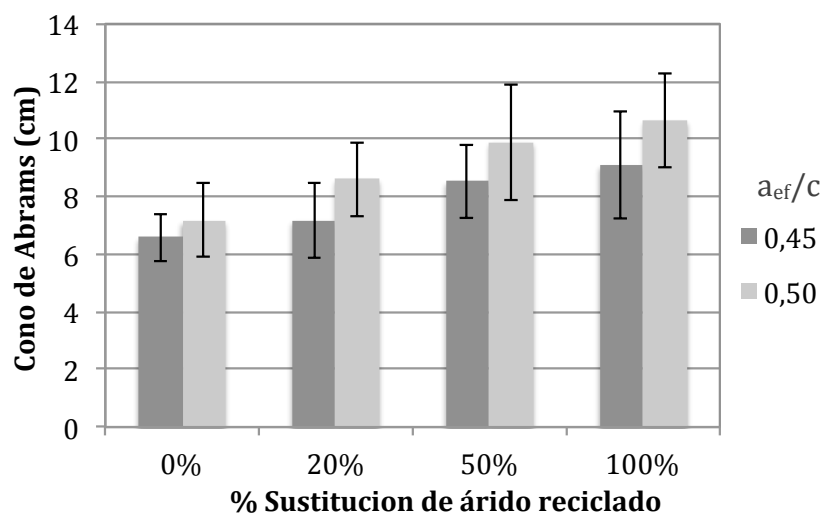


Figura 7.1. Asentamiento del cono de Abrams para hormigones con diferentes porcentajes de árido reciclado, según su relación a_{ef}/c .

La mayor variación en la consistencia ocurre cuando se sustituye una mayor cantidad de árido reciclado, porque el ajuste del agua a añadir depende de las condiciones de humedad del árido reciclado en el momento de la mezcla y la continuidad de sus propiedades es menos evidente, especialmente cuando se trata de la demanda de agua a causa de su capacidad de absorción. La mayor docilidad del hormigones con mayor cantidad de árido reciclado también puede ser debida a la forma y granulometría del árido utilizado, ya que la incorporación de árido reciclado aumenta el coeficiente de forma del árido conjunto, modificando así la curva granulométrica (Sánchez, 2004).

7.1.2 Densidad

Se ha determinado la densidad en el hormigón endurecido en condiciones de recepción (UNE-EN_12390-7, 2009), encontrando valores que oscilan entre los 2263 y 2412 Kg/m³ para hormigones de relación a_{ef}/c 0,45 y entre 2259 y 2404 Kg/m³ para hormigones de relación a_{ef}/c 0,50. El menor valor de densidad corresponde en todos los casos para el hormigón con 100% de sustitución de árido reciclado y el mayor para el hormigón de control 0% (Figura 7.2).

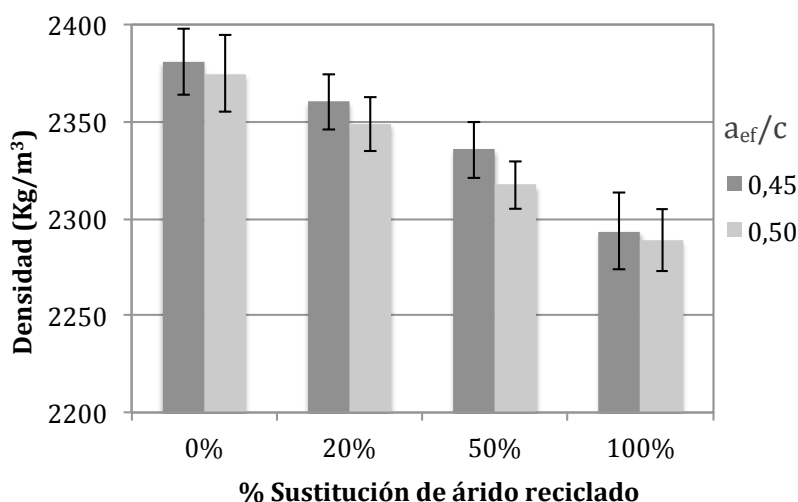


Figura 7.2. Densidad del hormigón a 28 días en condiciones de recepción para hormigones con diferentes porcentajes de sustitución de árido reciclado.

La densidad de un hormigón depende principalmente de la densidad de los áridos empleados en su fabricación y del mortero adherido a estos. Los áridos reciclados

tienen una menor densidad que los áridos naturales, por lo que la densidad del hormigón desciende a medida que aumenta la cantidad de áridos reciclados en la mezcla. Sin embargo, los descensos obtenidos para esta propiedad no son valores significativos, 1%, 2% y 4% para sustituciones de árido reciclado de 20%, 50% y 100% respectivamente. Para las dos relaciones a/c estudiadas el descenso se sitúa en las mismas proporciones. Lo que significa que respecto a los valores de la bibliografía los hormigones estudiados presentan una baja reducción en la densidad para hormigones con 100% de árido reciclado, teniendo en cuenta que los valores encontrados en el estado del arte están entre 4 y 12% menores respecto a un hormigón con árido natural (Pryce-Jenkins, 2011).

7.1.3 Resistencia a Compresión

Se presentan los resultados obtenidos para la resistencia a compresión (UNE-EN_12390-3, 2009) sobre probetas cilíndricas de 150x300mm, evaluada a distintas edades de curado del hormigón 7, 28, 90, 180 y 365 días.

El valor medio de al menos tres probetas ha sido utilizado para el análisis de la evolución de la resistencia en el tiempo. En general, se ha obtenido que todos los hormigones cumplen con la resistencia a compresión a 28 días proyectada, 40MPa y 35MPa, para una relación a_{ef}/c 0,45 y 0,50 respectivamente. Sin embargo es evidente que la utilización de áridos reciclados en el hormigón, genera una disminución en la resistencia a compresión, a medida que se incrementa la cantidad de árido reciclado en la mezcla (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002; Berndt, 2009; Kou *et ál.*, 2011; Somna *et ál.*, 2011). Esta diferencia de los hormigones reciclados respecto al hormigón de referencia 0%, se reduce con el tiempo para las dos relaciones a_{ef}/c estudiadas. En la Figura 7.3 y Figura 7.4 se observa como a largo plazo los valores de resistencia son prácticamente iguales.

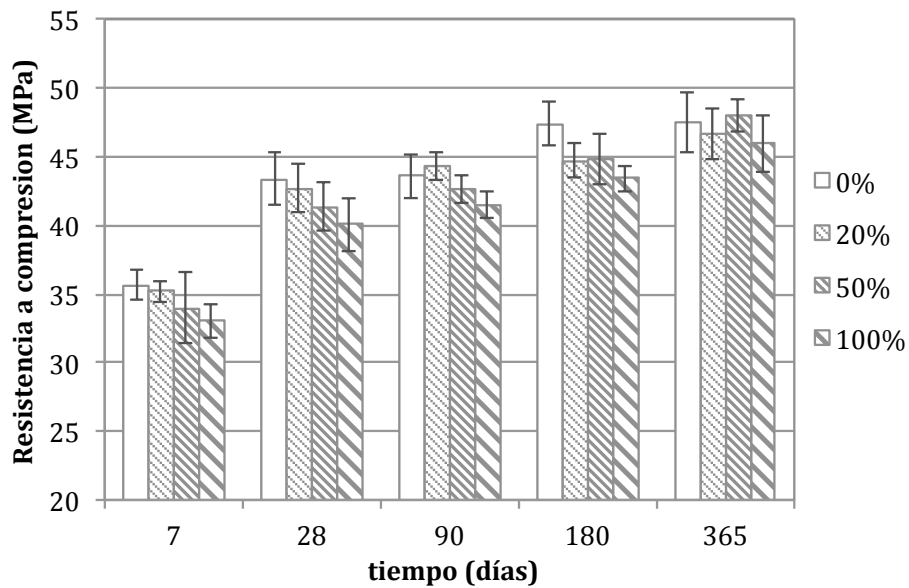


Figura 7.3. Evolución de la resistencia a compresión de hormigones con relación a_{ef}/c 0,45 y diferentes cantidades de árido reciclado.

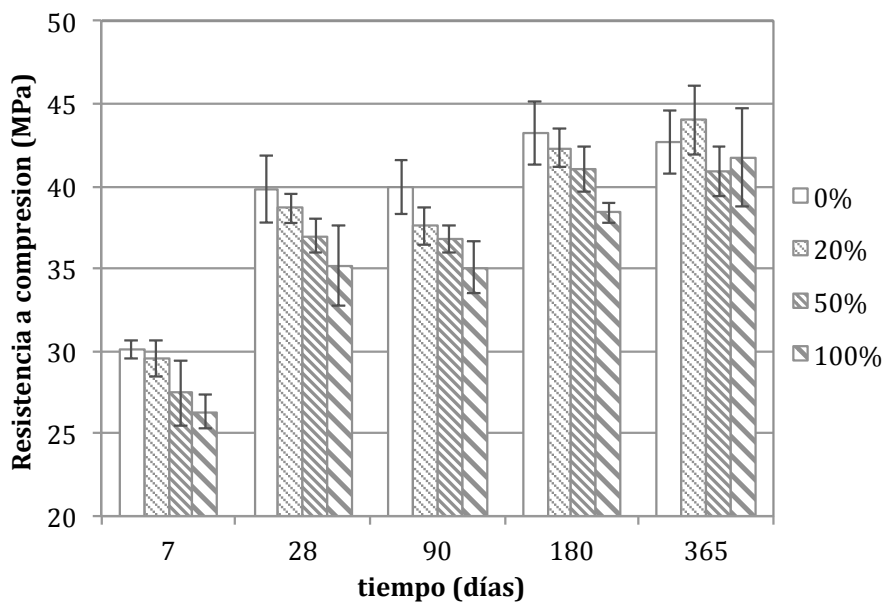


Figura 7.4. Evolución de la resistencia a compresión de hormigones con relación a_{ef}/c 0,50 y diferentes cantidades de árido reciclado.

En la Figura 7.5 se observa como los valores de resistencia a compresión a 28 días de los hormigones con relación a_{ef}/c 0,45 y 0,50 disminuyen a medida que el porcentaje de árido reciclado en la mezcla es mayor. Para porcentajes de sustitución 20%, 50% y 100% de árido reciclado con a_{ef}/c 0,45, disminuyen 1,6%,

4,7% y 7,6% respectivamente, frente al hormigón de control. Mientras que para hormigones con relación a_{ef}/c 0,50 la diferencia respecto al control aumenta ligeramente a 2,9%, 7,1% y 11,7% para 20%, 50% y 100% respectivamente (Figura 7.5).

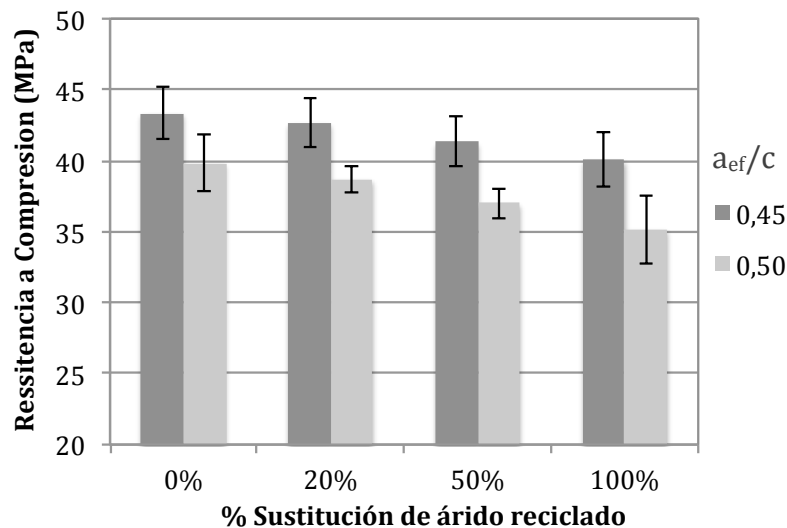


Figura 7.5. Resistencia a Compresión a 28 días para hormigones con relación a_{ef}/c 0,45 y 0,50 con diferentes cantidades de árido reciclado.

Los valores encontrados en la bibliografía para hormigones con 100% de árido grueso reciclado, se mueven en un rango muy amplio, la mayoría entre +10% y -20%, presentando un valor medio de -6,9% (Sánchez, 2004), para una resistencia de control entre 30 y 40 MPa, por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo son acordes con la mayoría de los investigadores.

Los valores presentados en la Figura 7.6 corresponden a los coeficientes de variación de las resistencias obtenidas para cada edad de ensayo. Los porcentajes de variación se encuentran dentro del rango esperado para hormigones con árido reciclado (CLEAM, 2011).

El coeficiente de variación es sensible al aumento en la relación a_{ef}/c , encontrando en general valores más altos cuando la relación a_{ef}/c es de 0,50. En cualquier caso el coeficiente de variación de la resistencia presenta valores normales para hormigón estructural.

Los coeficientes de corrección para la resistencia a compresión según el porcentaje de sustitución de árido reciclado se presentan en la Figura 7.7, donde se hace referencia a la resistencia respecto al hormigón de control (0%), con áridos naturales. Con las barras se representan los coeficientes obtenidos en esta investigación y con los puntos rojos los coeficientes presentados en la bibliografía (Sánchez, 2004). Es interesante observar que aunque en los dos casos (ensayos propios y bibliografía) el coeficiente disminuye a medida que aumenta el contenido de árido reciclado, las tendencias son distintas al comparar la variación del coeficiente para igual porcentaje de sustitución respecto a dos valores de resistencia a compresión.

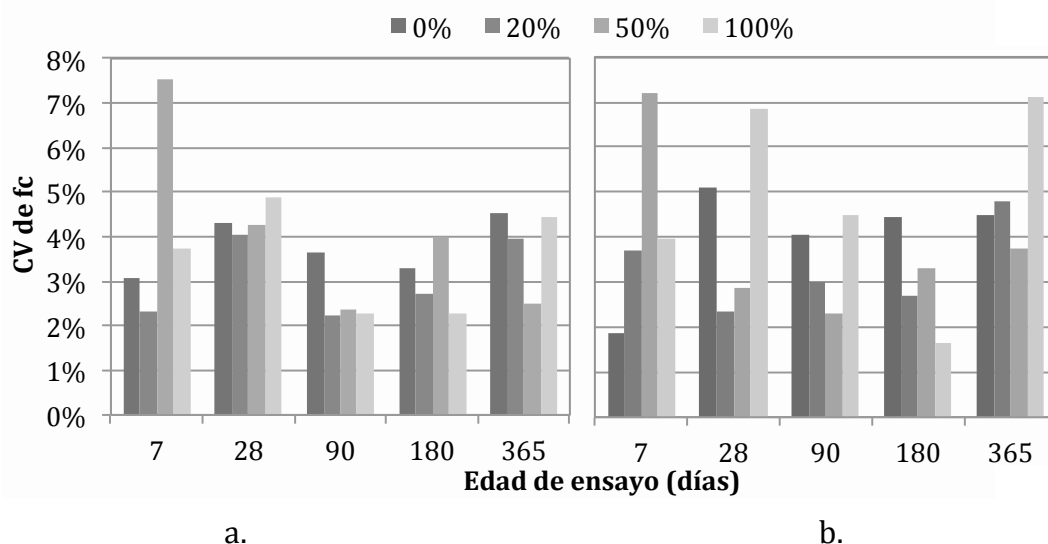


Figura 7.6. Coeficientes de Variación sobre la resistencia a compresión para hormigones con árido reciclado ensayados a distintas edades para las relaciones a_{ef}/c 0,45 (a), 0,50 (b).

Así, para un hormigón con 50% de árido reciclado, los datos de la bibliografía muestran que el coeficiente es mayor cuanto menor es la resistencia (0,95 para 35MPa y 0,93 para 50MPa), lo que significa que la influencia del árido reciclado es más significativa para hormigones con mayor resistencia a compresión y por lo tanto menores relaciones a/c . Lo cual es razonable en el caso en el que la relación a/c sea menor de 0,4 ya que los áridos intervienen significativamente en la resistencia, pero para relaciones a/c mayores que 0,4, como es el caso, es la pasta quien tiene más influencia en la resistencia.

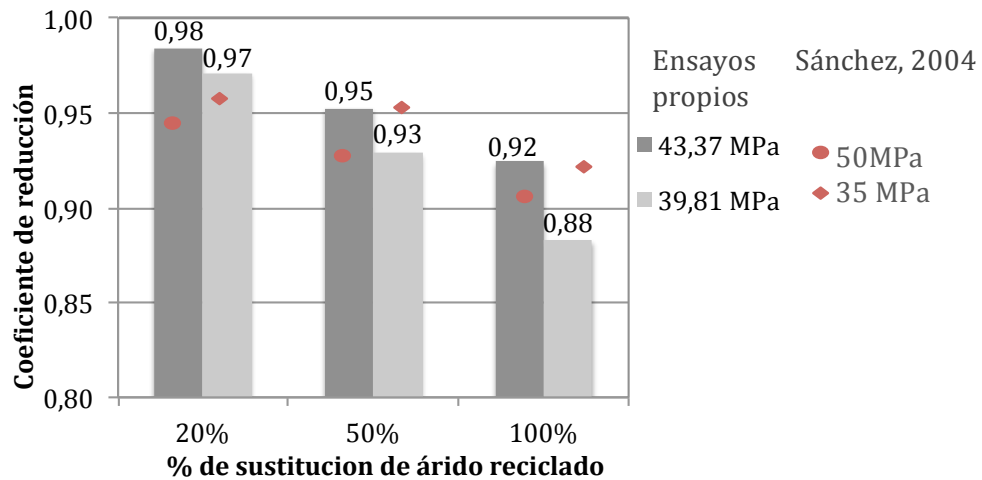


Figura 7.7. Coeficientes de reducción para la resistencia a compresión para hormigones con árido reciclado respecto a un hormigón con árido natural.

No obstante, tanto en los resultados de este trabajo como en los de Sánchez (2004) las diferencias en función de la relación a/c son mínimas.

La resistencia de un hormigón, depende de dos factores: la relación a/c y el grado de compactación (Neville, 1988). Por lo que en un hormigón totalmente compactado la resistencia es inversamente proporcional a la relación a/c (Abrams, 1919).

La influencia del tipo de árido grueso en la resistencia del hormigón varía según la relación a/c de la mezcla. A medida que se incrementa la relación a/c la influencia de los áridos disminuye, probablemente porque la propia resistencia de la pasta de cemento hidratada es más importante, convirtiéndose en el punto débil. Así con una relación a/c mayor de 0,40, por ejemplo 0,65 quien determina la capacidad resistente del hormigón es la resistencia de la pasta, pero con una relación a/c menor de 0,40 el árido juega un papel más importante (García, 2004).

La ecuación propuesta por De la Peña, vincula la resistencia y la relación a/c ha sido evaluada para los hormigones con árido reciclado por Sánchez (2004), aplicando unos coeficientes de corrección según el tipo de cemento, el tipo de árido (machacado o rodado) y la cantidad de árido reciclado Así según la ecuación de la Peña:

$$c/a = \frac{k}{r} \cdot f_{cm.hr} + 0,5 \quad (e.7.1)$$

donde c/a = relación cemento / agua total (c/a_{tot})

r = coeficiente de reducción según la cantidad de árido reciclado sustituido.

K = valor en función del tipo de árido y ($K=0,026$ áridos machacados y
Cemento 52,5)

Para este trabajo con un cemento I 52,5 SR, áridos machacados y los coeficientes obtenidos experimentalmente, las ecuaciones son presentadas en la Tabla 7.3:

Tabla 7.3. Ecuaciones para la evaluación de la resistencia a partir de la relación a/c , según la formulación propuesta por De la Peña.

% de sustitución de árido (CEM I 52,5R)		Ecuación de la Peña
Hormigón control - 0% árido reciclado	R=1	$c/a = 0,026x_{fcm} + 0,5$
Hormigón 20% árido reciclado	R= 0,98	$c/a = 0,027x_{fcm} + 0,5$
Hormigón 50% árido reciclado	R= 0,94	$c/a = 0,028x_{fcm} + 0,5$
Hormigón 100% árido reciclado	R= 0,90	$c/a = 0,029x_{fcm} + 0,5$

Con la aplicación de los coeficientes de reducción obtenidos (Figura 7.7) y utilizando la ecuación propuesta por De la Peña, se presenta en la Figura 7.8 la tendencia de los valores de resistencia, donde se distinguen los resultados obtenidos experimentalmente y los determinados aplicando dicha ecuación. Se puede decir que la ecuación de De la Peña predice bien la resistencia para valores altos de relación a_{tot}/c , pero sobre estima la resistencia para valores menores de relación a_{tot}/c , donde se encuentran tanto hormigones con árido natural 0% como hormigones reciclados (20 y 50%). Esta diferencia puede ser debida al tipo de árido utilizado (Sánchez, 2004).

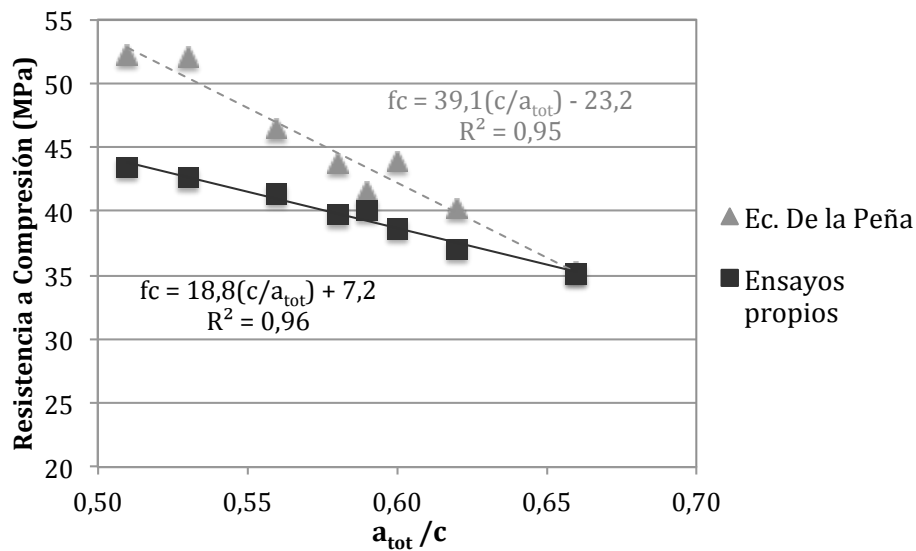


Figura 7.8. Resultados de la resistencia media a compresión del hormigón. Valores experimentales y según la ecuación de La Peña con los factores de corrección para cada relación a_{tot}/c .

7.1.4 Resistencia a Tracción

En la Figura 7.9 se presentan los resultados del ensayo de Resistencia a tracción indirecta realizado. En general esta propiedad no se ve afectada significativamente por el uso de áridos reciclados.

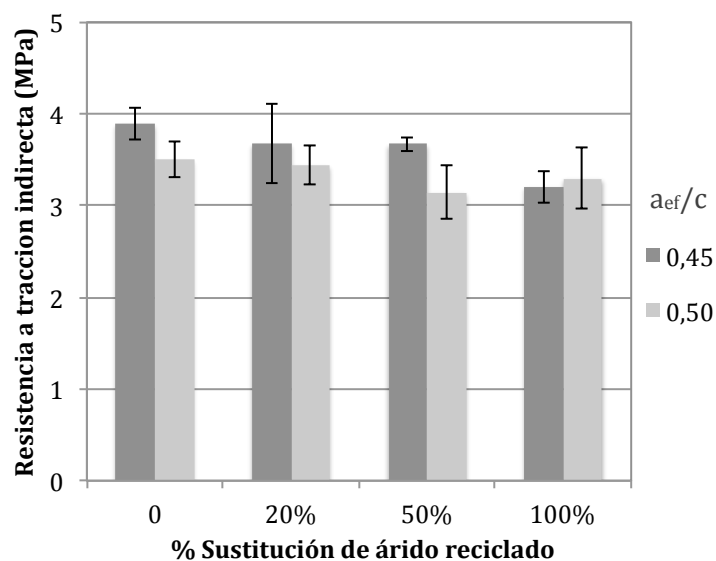


Figura 7.9. Resistencia a tracción indirecta a 28 días según el porcentaje de sustitución de árido reciclado para las relaciones a_{ef}/c estudiadas.

Se observan valores oscilan entre 3,14 y 3,93 MPa. Los descensos de la resistencia a tracción respecto al hormigón de control oscilan entre 4 y 16% para una sustitución de 20% a 100% de árido reciclado, coincidiendo con (Poon et al, 2006; Kou et al, 2007; Soutsos et al, 2011).

En la Figura 7.10 se presentan los resultados experimentales y los valores obtenidos a partir de los coeficientes presentados en la bibliografía respecto a la resistencia a tracción del hormigón de control (Sánchez, 2004), y según las ecuaciones establecidas en la EHE y la ACI-318 (Tabla 2.12.) a partir de la resistencia a compresión de cada hormigón.

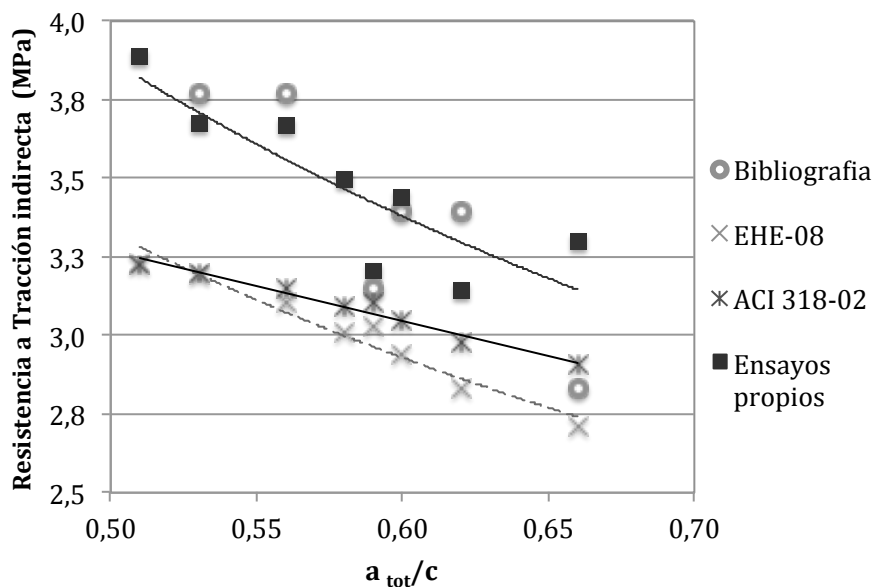


Figura 7.10. Evaluación de la resistencia a tracción indirecta de hormigones con árido reciclado bajo distintos criterios.

En general las ecuaciones propuestas en la EHE-08 y en ACI-02 (tabla 2.11) para estimar la resistencia a tracción indirecta a partir de los resultados de resistencia a compresión, son muy acertadas y están del lado de la seguridad. Los valores experimentales obtenidos en este trabajo siguen una tendencia similar a los valores calculados aplicando los coeficientes del estado del arte para las distintas relaciones a/c , aunque los coeficientes para un 100% de sustitución son conservadores al igual que las ecuaciones utilizadas, lo que significa que las predicciones de resistencia a tracción se encuentran en todos los casos del lado de la seguridad. La relación establecida bajo distintos códigos para la resistencia a

tracción según la resistencia a compresión es válida para hormigones con árido reciclado, siendo irrelevante la cantidad de árido reciclado utilizada o la categoría resistente del hormigón reciclado. La estimación de la EHE es conservadora.

En la Figura 7.11 se presenta la relación entre los resultados obtenidos para la resistencia a compresión y la resistencia a tracción indirecta de los hormigones estudiados. Se obtuvo que la resistencia a tracción indirecta representa entre un 8% y un 9,4% de la resistencia a compresión a 28 días.

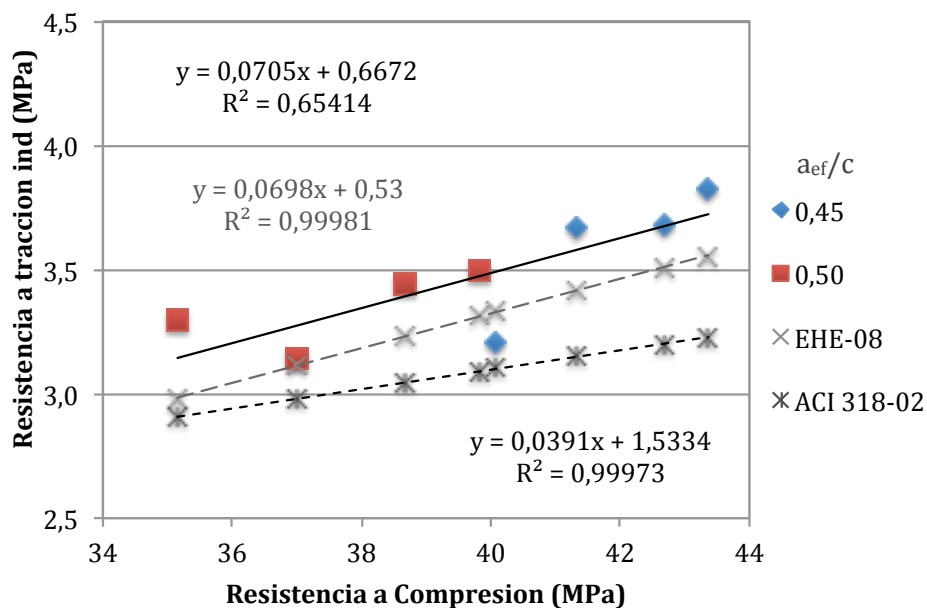


Figura 7.11. Resistencia a compresión vs. resistencia a tracción indirecta a 28 días.

7.1.5 Módulo de Elasticidad

Para determinar el módulo de elasticidad en el hormigón se ha utilizado el procedimiento descrito en la norma española UNE 83316:1996 Determinación del módulo de elasticidad en compresión.

En la Figura 7.12 se observa claramente el descenso del valor del módulo de elasticidad en el hormigón a medida que se sustituye una mayor cantidad de árido reciclado, como ya se afirmaba en la bibliografía (apartado 2.3., tabla 2.7). La relación a/c también tiene un papel importante como se observa, ya que para un

mismo grado de sustitución de árido reciclado, el módulo para un hormigón con relación a_{ef}/c 0,50 es menor.

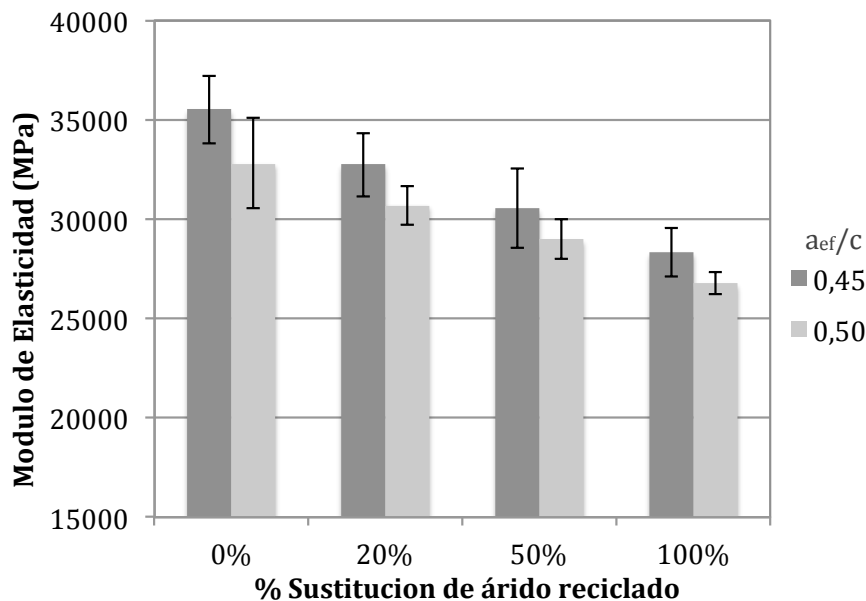


Figura 7.12. Modulo de Elasticidad evaluado a 28 días según el porcentaje de sustitución de árido reciclado para cada relación a/c estudiada.

Para sustituciones del 20% de árido reciclado en el hormigón, el módulo de elasticidad desciende entre un 6-8%, mientras que cuando se sustituye un 50% el modulo disminuye entre un 13-15%. En el caso de una sustitución total de árido reciclado grueso (100%) el módulo de elasticidad para este caso se reduce entre un 20 y 25%. En general se han obtenido valores experimentales similares a los encontrados en la bibliografía (Hansen, 1985), (Ravindrarajah & Tam, 1985).

Es importante enfatizar en que finalmente los hormigones tienen una relación a_{tot}/c que aumenta a medida que se sustituye árido reciclado en el hormigón, por lo que evidentemente el módulo descenderá.

En la bibliografía se encuentran distintas ecuaciones para estimar el módulo de elasticidad en hormigones con árido reciclado a partir de la resistencia a compresión, como se presento en el estado del arte (apartado 2.3.2.4. Tabla 2.13.). En esta sección se evalúa el módulo de elasticidad con las ecuaciones propuestas por (Kakizaki, 1988), (Zilch & Roos, 2001), (ACI 318, 2002), seleccionadas por involucrar en el cálculo además de la resistencia a compresión, la densidad del

hormigón que permite tener una idea de la cantidad de árido reciclado sustituida, ya que indudablemente ésta disminuye a medida que aumenta la cantidad de áridos reciclados en el hormigón. Se presentan los resultados de los hormigones con 20%, 50% y 100% de árido reciclado. La ecuación propuesta por (Dhir, Limbachiya, & Leelawat, 1999), aunque solo contempla la resistencia a compresión, presenta un ajuste dentro del rango de las ecuaciones seleccionadas y es por esto que también se presenta (Figura 7.13 y Figura 7.14).

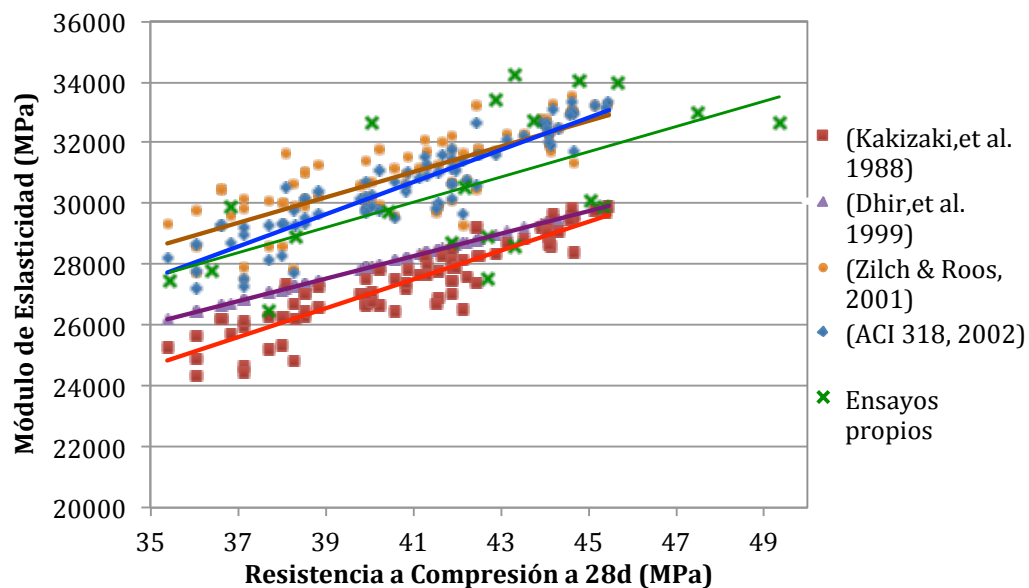


Figura 7.13. Evaluación del módulo de elasticidad para hormigones con relación a_{ef}/c 0,45 a partir de los valores de resistencia a compresión.

En general no existe una ecuación que se ajuste completamente a los valores obtenidos experimentalmente, debido a que muchos son los factores que influyen, dentro de las propiedades del hormigón con árido reciclado, además no todos los investigadores siguen el mismo ensayo. Sin embargo los valores que arroja la ecuación propuesta por la ACI 318, 2002, se acercan bastante a los valores obtenidos experimentalmente (Figura 7.15 y Figura 7.16).

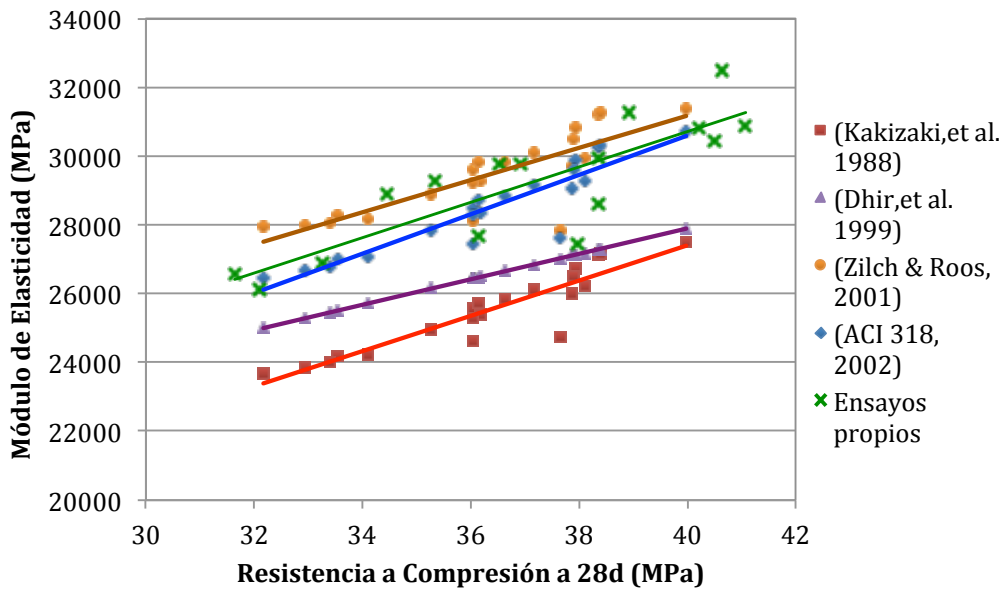


Figura 7.14. Evaluación del módulo de elasticidad para hormigones con relación a_{ef}/c 0,50 según la resistencia a compresión.

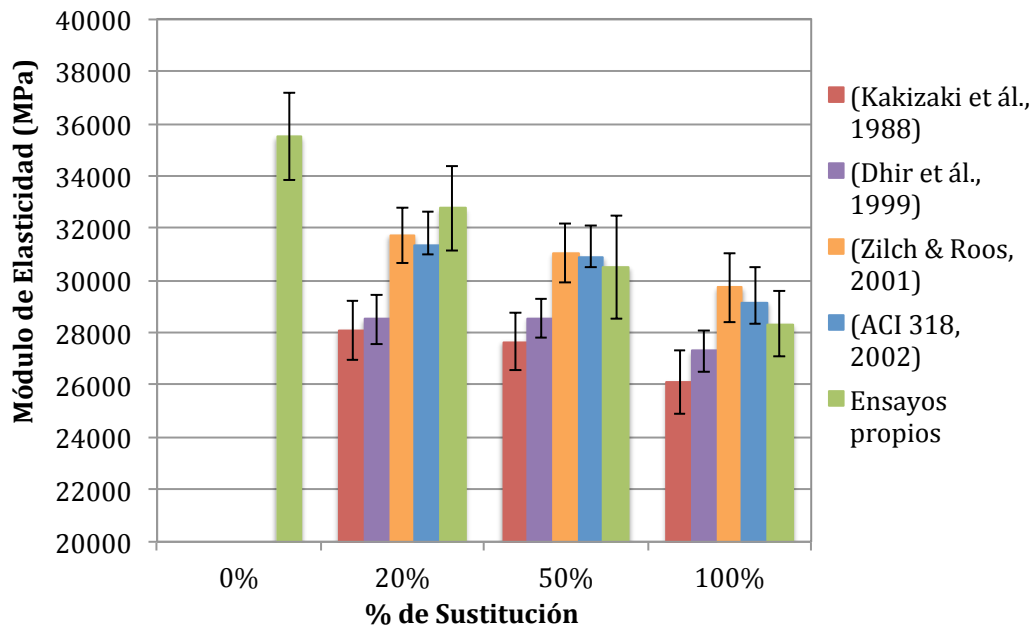


Figura 7.15. Evaluación del módulo de elasticidad para hormigones con relación a_{ef}/c 0,45 el contenido de árido reciclado.

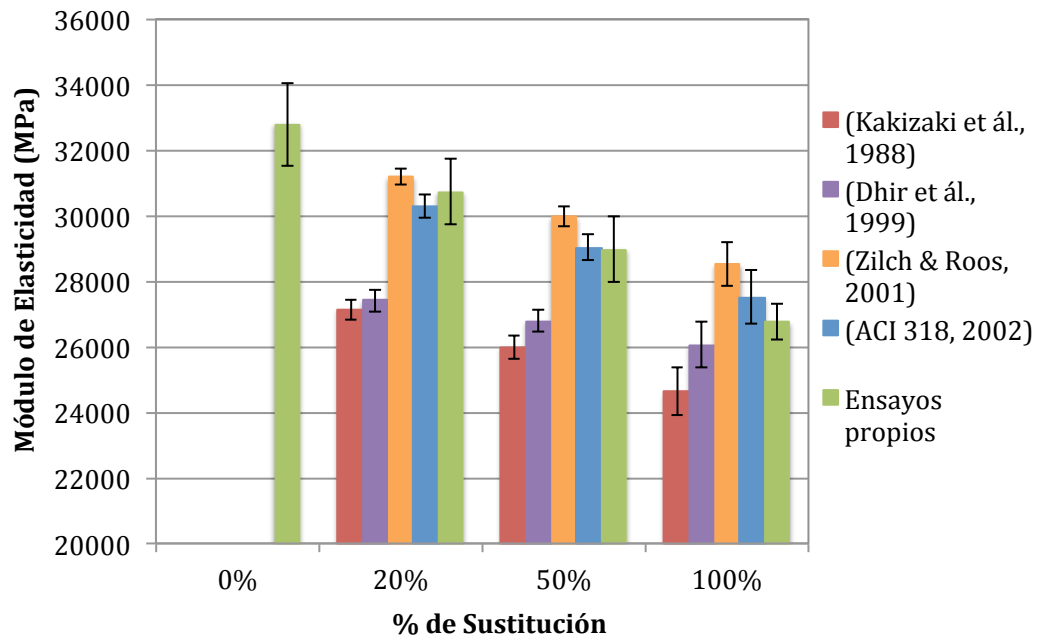


Figura 7.16. Evaluación del módulo de elasticidad para hormigones con relación a/c 0,50 el contenido de árido reciclado.

En cualquier caso, el módulo de elasticidad, es una propiedad que siempre disminuye a medida que aumenta el contenido de árido reciclado en la mezcla. Los resultados conducen a reafirmar que el módulo de elasticidad es una propiedad sensible en hormigones con áridos reciclados (Sánchez, 2004), por lo que cambios en la calidad del árido reciclado y evidentemente su contenido en la mezcla, se traducen en una disminución del módulo de elasticidad del hormigón.

7.2 Microestructura del hormigón

Las propiedades mecánicas y la durabilidad son propiedades macroscópicas que dependen de la microestructura del hormigón (Flatt *et ál.*, 2012). La existencia de distintas zonas de interfase, debido a las características del árido reciclado hacen necesario un análisis de la microestructura del hormigón con árido reciclado. Se realizó una observación a nivel microestructural en muestras de hormigón constituidas con árido reciclado, haciendo énfasis en la interfase entre: (i) mortero antiguo (adherido al árido reciclado) y el mortero nuevo, (ii) entre el mortero

antiguo y el árido antiguo (árido reciclado); y (iii) entre el mortero nuevo y el árido antiguo (árido reciclado sin la presencia de mortero adherido). En la Figura 7.17 se observa la sección transversal de muestras de hormigón con diferentes contenidos de árido reciclado, en el cual se indica los tres tipos de interfase anteriormente descritos y que serán discutidos con mayor detalle en el presente apartado.

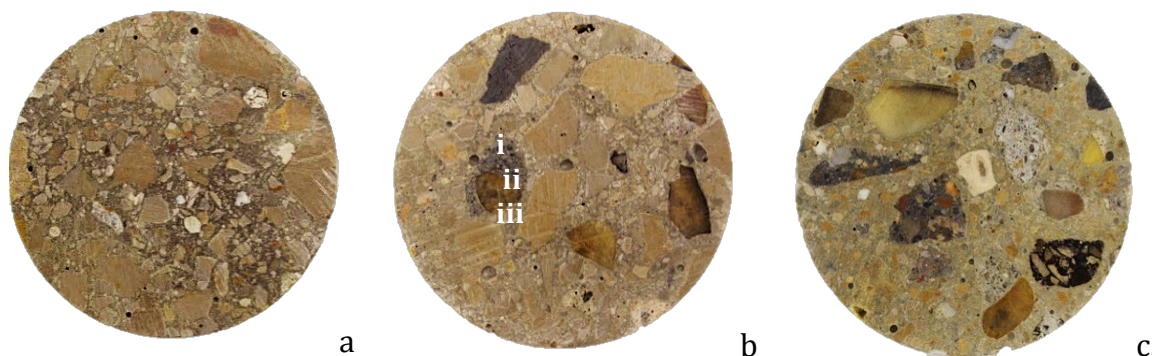


Figura 7.17. Sección transversal de probetas de hormigón a/c 0,50 con distintas cantidades de árido reciclado a. 0%, b. 50% y c. 100%.

El uso del áridos reciclados puede afectar las propiedades del hormigón debido al comportamiento débil de la interfase entre la pasta de cemento y el árido reciclado. No obstante, es importante resaltar que el tipo de proceso empleado en la fabricación de hormigón con reciclado, puede tener un efecto en el mejoramiento de las propiedades de esta interfase (capítulo 2.4). En este estudio el hormigón es fabricado con los áridos en estado natural, añadiendo el agua a la mezcla en dos tiempos, uno al inicio (aprox. 1/3 del agua a añadir) con los áridos gruesos, y el resto al final después de añadir los áridos finos y el cemento.

La evaluación microestructural fue llevada a cabo en un microscopio electrónico de barrido SEM. Muestras de hormigones con árido natural y árido reciclado (0% y 100%) fueron acondicionadas y observadas con el detector de electrones secundarios (trozos de muestras) y con el detector de electrones retrodispersados (muestras embutidas) bajo las condiciones descritas en el apartado 5.3.6.

7.2.1 Evaluación de la interfase árido/pasta de cemento hidratada

Se realizó una inspección microestructural de la interfase entre áridos y la matriz en pastas constituidas con árido reciclado y árido natural mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) con el fin de identificar las principales diferencias en la adherencia de los áridos (natural y reciclado) y la nueva pasta de cemento. En las micrografías de la Figura 7.18 se señalan las interfases entre las pasta de cemento con el árido natural y con el árido reciclado. en las micrografías de la Figura 7.18.a. se presentan las muestras con árido natural y en la Figura 7.18 .b. las muestras con árido reciclado de hormigón.

La pasta nueva de cemento es identificada por la presencia de cemento sin hidratar, correspondiente a las partículas blancas de mayor intensidad. Cabe resaltar que algunas de las grietas presentes en la pasta de cemento (señaladas con la letra g) pueden ser atribuidas al agrietamiento de la muestra durante su preparación. Para ambos casos es posible observar una separación entre la pasta y el árido, ligeramente mayor para las pastas constituidas con árido natural (señalada con la letra o, en la Figura 7.18.a.).

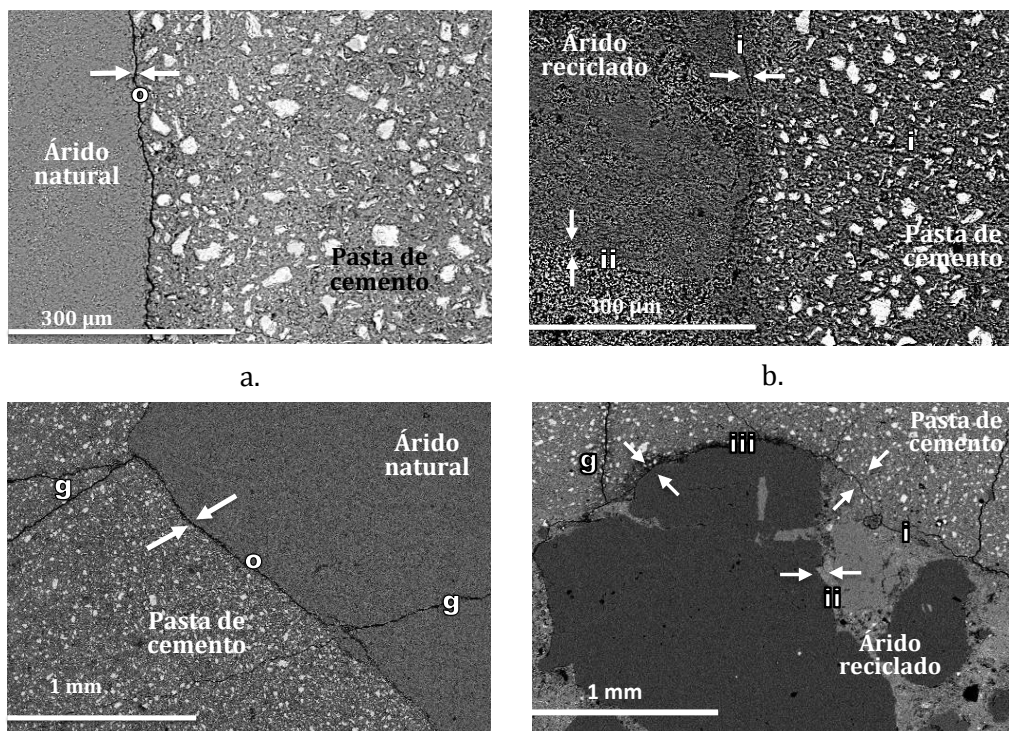


Figura 7.18. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) obtenidas por electrones retrodispersados en hormigones con árido natural (a) y árido reciclado (b).

Esto puede ser atribuido a que la superficie rugosa y más heterogénea de los áridos reciclados contribuye con el anclaje mecánico de la interfase (i). No obstante la presencia de un mejor anclaje mecánico entre el árido reciclado y la pasta nueva de cemento (Figura 7.18.b.) no conduce a la obtención de un mejor comportamiento mecánico, debido a la presencia de otras zonas de interfase (ii y iii) con un comportamiento diferente, por lo que los resultados de resistencia a compresión y módulo de elasticidad (apartado 7.1.3 y 7.1.5) son menores para hormigones con árido reciclado (100%) respecto a un hormigón con árido natural (0%).

Durante la preparación del hormigón con áridos reciclados puede existir un mayor contenido de agua en la superficie de los áridos que conduce a la obtención de interfases más débiles como consecuencia de la formación de una mayor cantidad de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CH) (Poon *et ál.*, 2004) dependiendo directamente de la calidad del árido reciclado.

El mapping de calcio obtenido por análisis EDS (Figura 7.19.b.) permite identificar fácilmente la presencia del árido antiguo de naturaleza caliza (Ca), la pasta antigua y la pasta nueva. En la Figura 7.19.a. se observan las interfases entre pasta nueva y antigua que exhiben igualmente una ligera separación (i e ii).

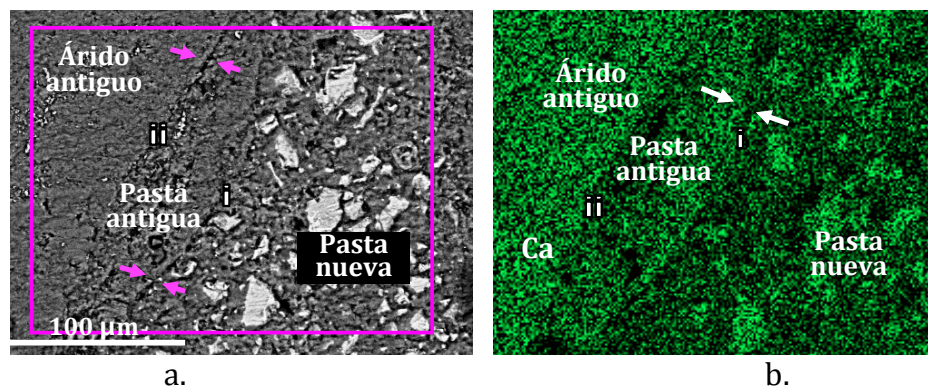


Figura 7.19. Identificación de las interfases presentes en una pasta con la inclusión de un árido reciclado a través de un mapping de Ca obtenido mediante análisis EDS.

Las micrografías que se presentan en la Figura 7.20 y Figura 7.22, contienen las imágenes obtenidas en el SEM con mapeos de calcio y silicio, procesadas con el software *Inca* que permite establecer los elementos encontrados en las muestras. Las imágenes obtenidas en el mapping de Ca para la pasta con el árido natural

(Figura 7.20.c) exhibe una deficiencia de este elemento rodeando la interfase (O) tal como se puede apreciar en las zonas señaladas por las flechas.

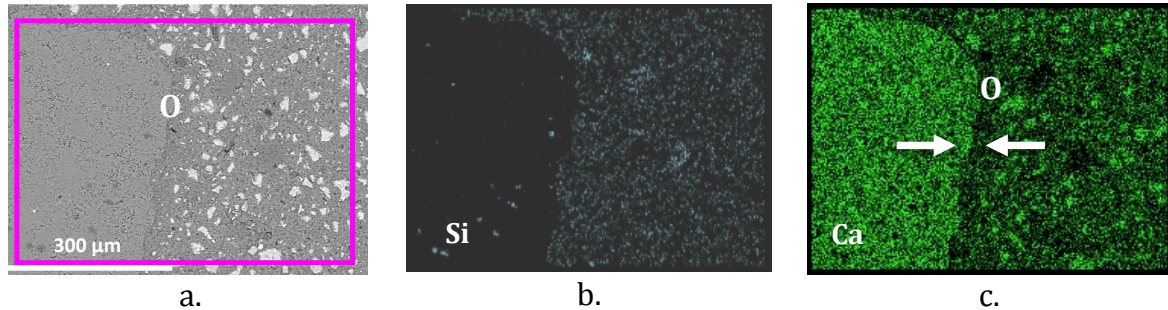


Figura 7.20. Análisis EDS en pastas con árido natural de origen calizo. a) Microfotografía de electrones retrodispersados. b) Mapping de sílice (Si). c) Mapping de calcio (Ca).

Por el contrario, esta deficiencia de Calcio (Ca) no es identificada para el caso de la pasta con el árido reciclado (mapping de Ca en la Figura 7.21.c). Se observa el contenido de calcio en el hormigón con árido reciclado, pero no se puede establecer una clara diferencia entre las interfases de la pasta antigua y la pasta nueva (i), evidentemente visibles en la micrografía de electrones retrodispersados Figura 7.21.a.

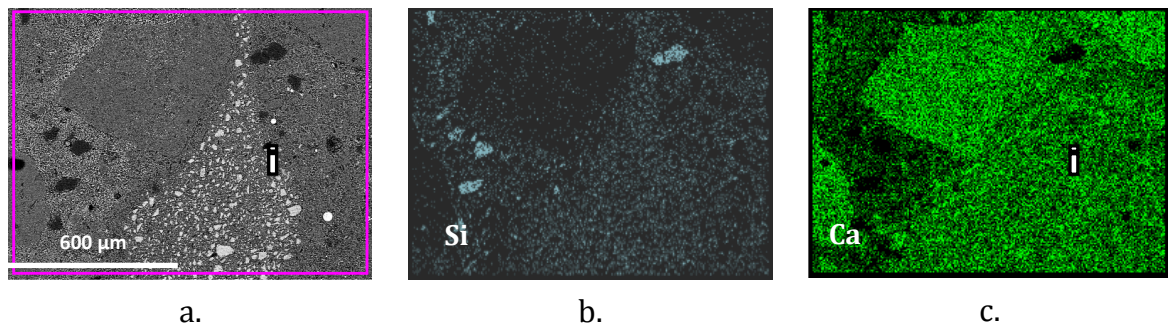


Figura 7.21. Análisis EDS en pastas con árido reciclado, árido grueso de naturaleza caliza y áridos finos de naturaleza silícea. a) Microfotografía de electrones retrodispersados. b) Mapping de sílice (Si). c) Mapping de calcio (Ca).

En la Figura 7.22.a. y b. se observa como en el hormigón con árido reciclado se pueden encontrar áridos reciclados de distinta naturaleza, así, en el caso de la Figura 7.22.a. el árido es de naturaleza silícea (Si), mientras que en la Figura 7.22.b. se observan áridos calizos (Ca). A pesar de la heterogeneidad del árido reciclado,

en general no se aprecian diferencias significativas en la concentración de Si o Ca en la interfase.

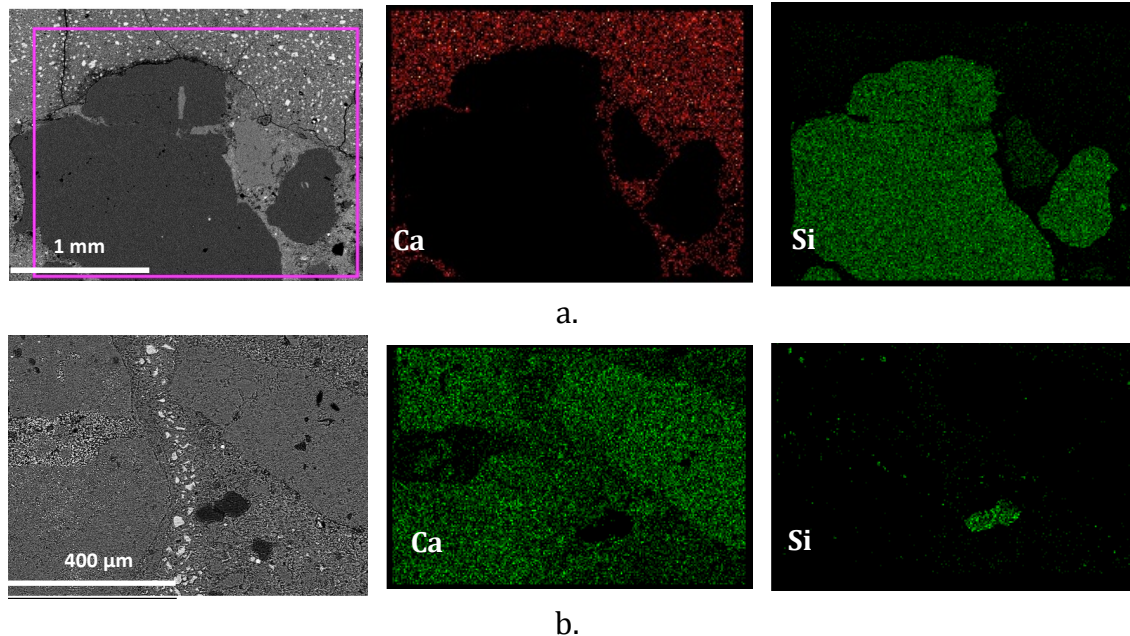


Figura 7.22. Micrografías por retro-dispersión y mapas de composición de un hormigón con árido reciclado. a) Árido reciclado de origen silíceo. b) Árido reciclado de origen calizo.

7.2.2 Análisis de la zona de transición en hormigones

En la Figura 7.23. se aprecia una serie de microfotografías obtenidas de la zona de transición de áridos reciclados de diferente naturaleza y la matriz de hormigón. En la Figura 7.23.a. la interfase entre el árido reciclado y la matriz de cemento es densa, y la zona de transición entre la pasta nueva y la antigua no se pueden distinguir fácilmente. Al realizar un acercamiento (Figura 7.23.b. y c.) se observaron grietas en la pasta antigua del árido reciclado al parecer producto de la manipulación de la muestra para el ensayo (g), pero en general en la pasta antigua y el árido reciclado se observó una buena adherencia, sin grandes poros en la interfase, como es posible observar en la Figura 7.23.d. De acuerdo con (Mymrin & Correa, 2007) las nuevas formaciones amorfas permiten el fortalecimiento de la interfase, lo cual puede justificar el incremento de la resistencia con el tiempo.

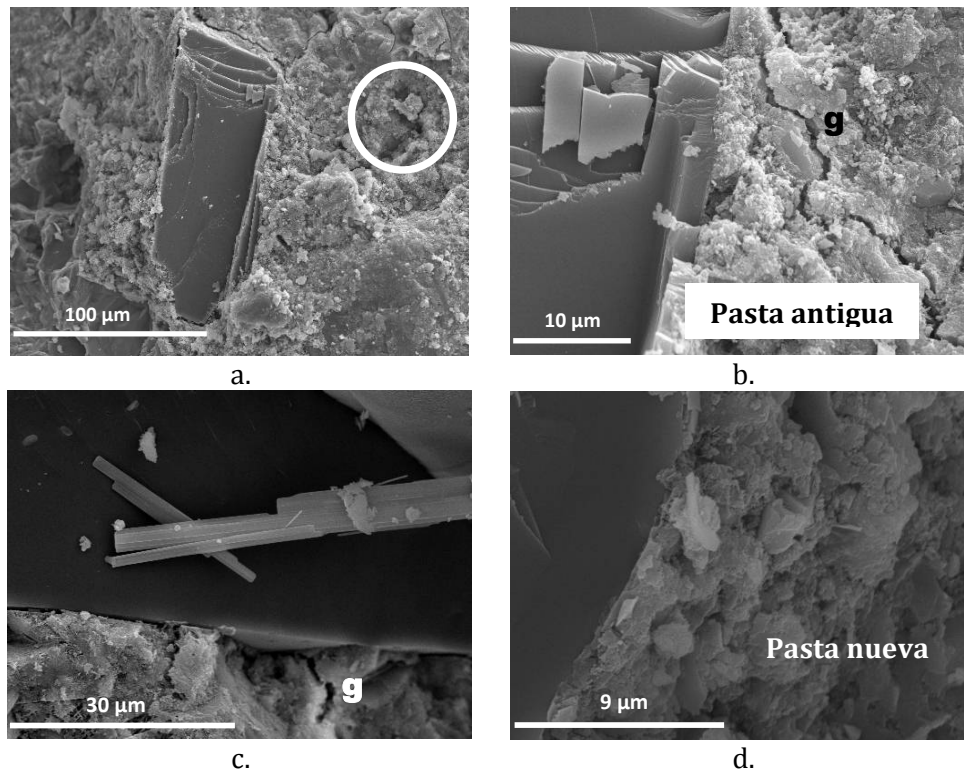


Figura 7.23. Imágenes por electrones secundarios de las interfaces del hormigón con árido reciclado.

En la Figura 7.24 se aprecia una microfotografía de la interfase entre un árido reciclado y la pasta de cemento. La imagen revela una brecha entre el árido y la pasta, así como la ausencia de productos que hayan sido formados a partir del árido reciclado.

Fue posible identificar contenidos de Ca significativamente mayores (alrededor de 5 veces más) frente a los contenidos de Si, como se observa en la Figura 7.24.b. donde se presentan los resultados de una de las doce mediciones de EDS obtenidas. Una elevada relación Ca/Si es atribuida fundamentalmente a la mayor presencia de portlandita (CH). Un análisis por difracción de rayos X (Limbachiya *et ál.*, 2007) indica la presencia de portlandita en el árido reciclado, la cual puede ser formada como consecuencia del contenido de agua en la superficie del árido reciclado que puede reaccionar con el cemento sin hidratar en el mortero adherido.

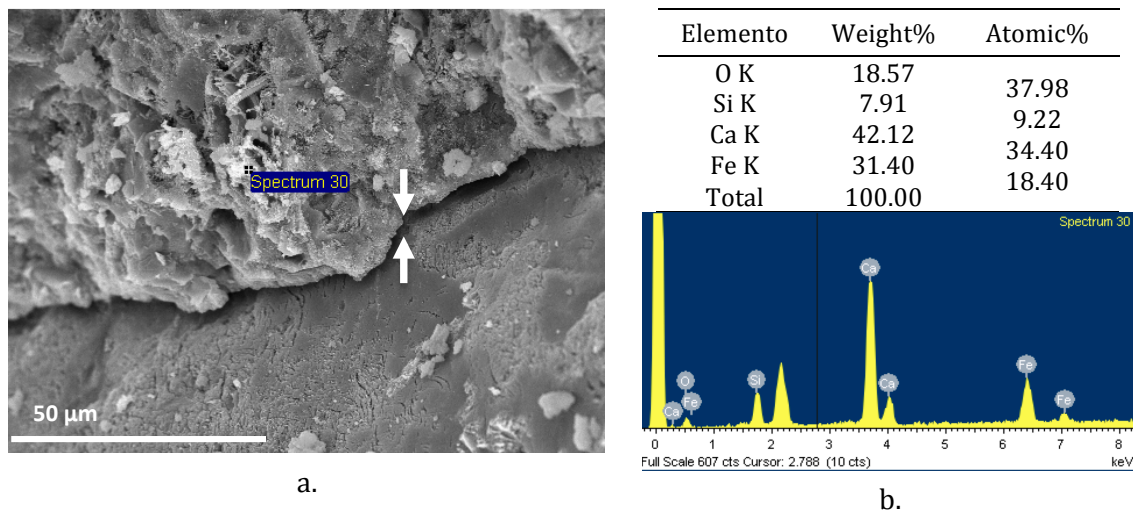


Figura 7.24. a) Micrografía de la zona de transición en el árido reciclado (árido antiguo/pasta antigua). b) Análisis EDS para la pasta antigua.

La presencia de portlandita (CH) puede de alguna manera justificar los menores resultados reportados para el módulo de elasticidad del hormigón con árido reciclado respecto a un hormigón con árido natural en iguales condiciones de a_{tot}/c .

La permeabilidad del hormigón está directamente relacionada con la distribución de tamaño de poro, así como el grado de interconectividad y tortuosidad que pueda presentar la red de poros (Scrivener & Pratt, 1996). La presencia de zonas de transición menos densas y porosas contribuye a un decremento en el comportamiento mecánico del material, así como un efecto negativo en algunas propiedades de durabilidad. En este sentido, el tratamiento al que son sometidos los áridos reciclados para su posterior utilización en hormigón puede conducir a la formación de micro fisuras que pueden o no estar conectadas dependiendo de la calidad de la pasta nueva, de acuerdo con (Baroghel-Bouny, 1994), además pueden presentarse algunos cambios en los compuestos mineralógicos de la pasta, se dice que la formación de etringita o portlandita están asociadas al cemento hidratado presente en el árido reciclado de hormigón.

En la Figura 7.25 se muestra una serie de microfotografías obtenidas por electrones secundarios de la interfase en los hormigones con árido reciclado en estudio, donde se observó la presencia de etringita, identificada mediante cristales

en forma de agujas. Su formación puede darse por la presencia de gel álcali-sílice o por el movimiento del agua a través del hormigón. Pueden encontrarse de forma masiva en hormigones antiguos, en los poros existentes, donde es más fácil su expansión de acuerdo con (St John *et ál.*, 1998).

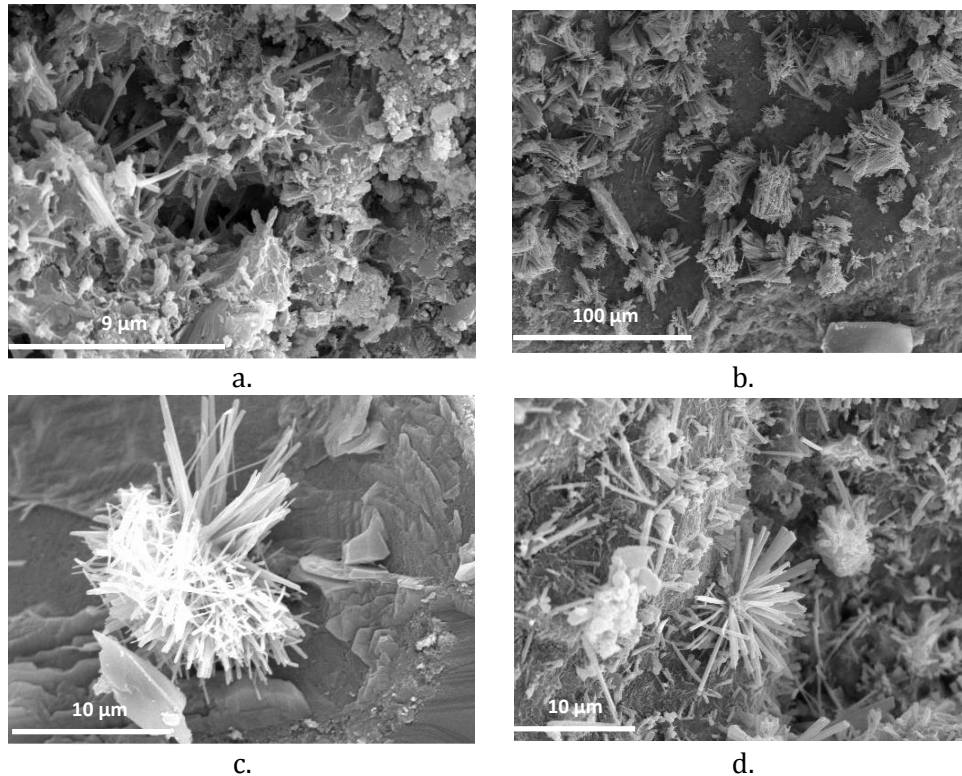


Figura 7.25. Zona de transición en hormigones a_{ef}/c 0,45 constituidos con áridos reciclados.

La aplicación de un procedimiento donde el agua se introduce a la mezcla en dos etapas (tal como fue desarrollado en este presente trabajo y descrito en capítulo 5.2.) permite obtener hormigones con un comportamiento adecuado frente a sus propiedades mecánicas como consecuencia de la obtención de zonas de transición más densas, debido a las partículas de cemento sin reaccionar presentes en el mortero adherido, que en el nuevo hormigón pueden reaccionar químicamente dando paso a la formación del gel C-S-H, Etringita e Hidróxido de Calcio CH, encontrados en hormigones con áridos reciclados, fabricados con proceso de premezclado (Tam *et ál.*, 2005), que hace referencia a un procedimiento en el que el agua es añadida en dos etapas.

Por otro lado, en la Figura 7.26 se observa una interfase entre la pasta nueva y el mortero adherido al árido reciclado, donde se identifica la presencia de productos de hidratación tipo silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) en el mortero antiguo (I). De acuerdo con (Tam *et ál.*, 2009) la interfase del hormigón con áridos reciclados puede ser mejor por el efecto de curado interno que se produce en la zona de transición, debido a que el agua presente en el árido reciclado es absorbida por el mortero adherido y puede contribuir a la formación de CSH (Silicato Cálcico Hidratado) (Corinaldesi & Moriconi, 2009). Así mismo, en el límite del árido reciclado fue posible identificar el crecimiento de cristales de portlandita en la pasta (Figura 7.26.a. (II)), identificados en forma de cristales laminares. En la Figura 7.26.b. se aprecian los cristales de portlandita, en forma de hexágonos.

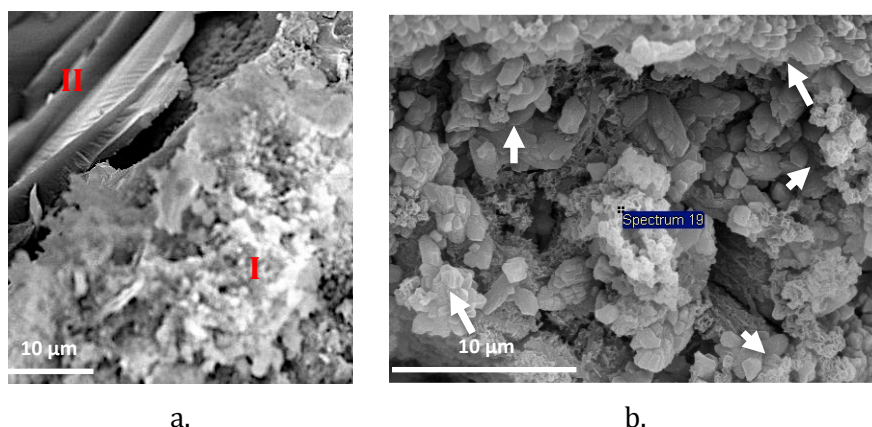


Figura 7.26. Productos formados en la interfase del hormigón con árido reciclado (100%).

Se puede decir que los áridos reciclados también contienen productos tipo CH que pueden reaccionar con el agua. La presencia de portlandita en el hormigón contribuye a mantener elevados niveles de alcalinidad, gracias a las reacciones puzolánicas y a la portlandita presente en el hormigón, que ha reaccionado con el cemento contenido en los áridos reciclados (Ihobe, 2011). De acuerdo con (Poon *et ál.*, 2004), (Tam *et ál.*, 2009), (Li *et ál.*, 2009) los hidratos recién formados poco a poco pueden llenar la zona de interfase y así fortalecer la adherencia entre el árido reciclado y la pasta nueva.

El alto contenido de C-S-H en la pasta antigua puede ser atribuido a la utilización de adiciones activas (como cenizas volante, humo de sílice, escorias, etc.) en el hormigón de origen del árido reciclado. Esto es corroborado por la observación en

el análisis microscópico por electrones secundarios, de adiciones embebidas en el mortero adherido al árido reciclado. En las micrografías (Figura 7.27) se observa ceniza volante en la pasta antigua adherida al árido reciclado, donde también es posible observar algunas fisuras que se encuentran en la pasta.

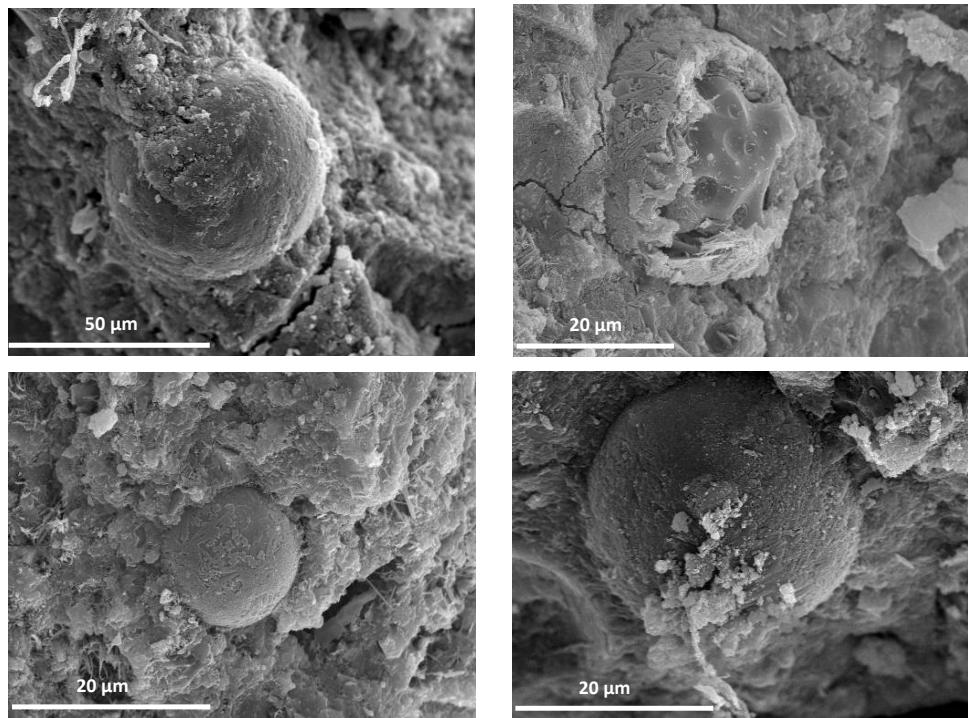


Figura 7.27. Microfotografías de la zona de interface del hormigón reciclado, donde se observan cenizas volantes en el árido reciclado.

En general, lo observado en el análisis microscópico parece positivo para el comportamiento frente a la corrosión de armaduras en hormigones con árido reciclado, ya que en el hormigón armado, la formación tanto de C-S-H como de CH juegan un papel importante en la prevención de la corrosión del acero de refuerzo. El gel C-S-H actúa como una red sólida que físicamente limita la penetración de elementos químicamente activos, mientras que el CH actúa como un disipador químico para el ingreso de CO_2 , reaccionando con éste y transformándose en Calcita, lo cual contribuye a mantener un pH alto alrededor del acero de refuerzo evitando la corrosión (Flatt *et ál.*, 2012).

Sin embargo mayores estudios son requeridos para evaluar la microestructura del hormigón con áridos reciclados de RCD si se quiere evaluar por ejemplo, el riesgo a

reacciones álcali-árido, ya que cuando se utilizan áridos reciclados, caracterizados por su heterogeneidad (p.e. diferentes propiedades de composición química o estructura de poros), se pueden presentar distintas interfaces en la estructura del hormigón (Poon *et ál.*, 2004) según sea la calidad del árido reciclado.

Capítulo 8

Evaluación de la durabilidad frente al riesgo de corrosión del hormigón con árido reciclado

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos sobre el comportamiento de hormigones con áridos reciclados frente a mecanismos de transporte como la permeabilidad, la capilaridad y la difusión, teniendo en cuenta que la durabilidad de un elemento de hormigón depende de la capacidad que tienen distintas sustancias en penetrar y moverse a través de su microestructura llegando a destruir la estabilidad física y química que lo protege. Posteriormente se evalúa la resistencia a la penetración de iones cloruro por medio del análisis de los coeficientes de difusión y finalmente la corrosión en hormigones armados, con árido reciclado respecto a hormigones con árido natural expuestos a un ambiente marino es evaluada.

A lo largo de este capítulo se analizaron hormigones con dos relaciones a_{ef}/c : 0,45 y 0,50 con porcentajes de sustitución de árido reciclado de hormigón (ArH) de 20%, 50% y 100% tomando siempre como referencia un hormigón fabricado con árido natural (0%).

Se analizaron además hormigones con relaciones a_{ef}/c 0,35, 0,40 y 0,60 para la máxima sustitución de árido reciclado (100%) con el objetivo de detectar tendencias frente a algunas propiedades de durabilidad (tabla 4.5.). Además con el mismo propósito también se estudia el comportamiento frente a la penetración de cloruros, un árido reciclado mixto de hormigón (ArMh).

Para analizar la corrosión de armaduras en el hormigón debida a la penetración de cloruros, fueron realizados ensayos de difusión de cloruros, además de evaluar la velocidad y el potencial de corrosión por medio del corrosímetro GECOR. Se determinó el perfil de cloruros sobre las probetas sometidas al ambiente agresivo de agua de mar, durante más de un año, con ciclos de inmersión secado tal como se describió en el apartado 4.3.2. del Planteamiento experimental.

Mediante ensayos de migración de cloruros (UNE 83987, 2009) se evalúa la penetración de cloruros en hormigones a distintas edades mantenidos en cámara húmeda, y mediante difusión natural se analiza el contenido de cloruros (UNE-EN-14629, 2007) sobre las probetas de hormigón sometidas durante un año a un ambiente de agua de mar.

8.1 Evaluación de los mecanismos de transporte en el hormigón

8.1.1 Porosidad

Se evaluó la porosidad para los hormigones con a_{ef}/c 0,45 y 0,50, con 20%, 50% y 100% de árido reciclado respecto al hormigón de control con árido natural (0%). Se obtuvo que en general el hormigón con árido reciclado presenta una mayor porosidad que el hormigón con árido natural, debido a la mayor porosidad de los áridos reciclados por el mortero adherido a éstos. A medida que se incrementa el contenido de árido reciclado en el hormigón la porosidad aumenta (Figura 8.1), sin embargo todos los hormigones presentan una calidad calificada como buena (<15%) desde el punto de vista de la corrosión de armaduras según el comité Euro-Internacional del hormigón (CEB, 1998), coincidiendo con los resultados de

(Zaharieva *et ál.*, 2003), (Gomez-Soberon, 2002). Por lo tanto parecen bien ajustados ambos límites, el de la porosidad según CEB (1998) y el de la relación $a_{ef}/c < 0,50$ según EN_206-1 (2000) para hormigones expuestos a ambientes agresivos (tabla 2.9).

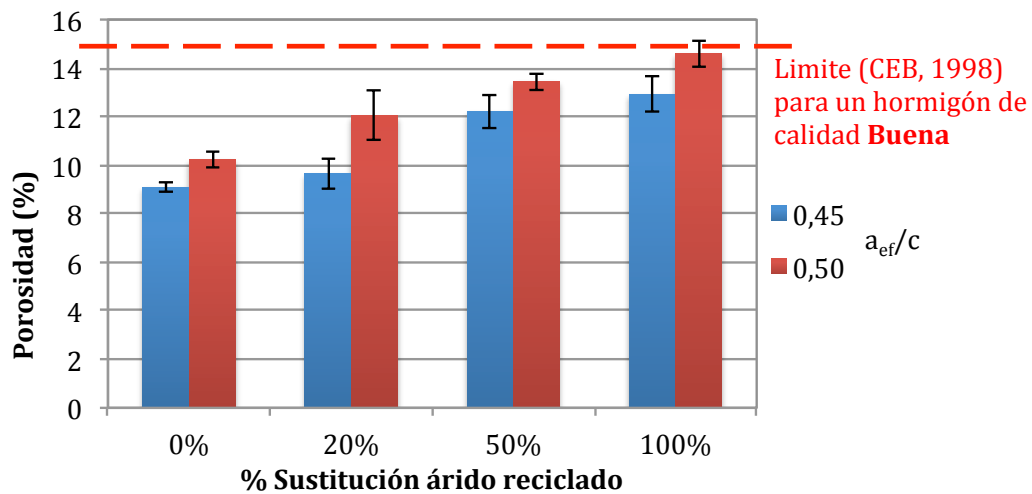


Figura 8.1. Porosidad de los hormigones a 28 días según la cantidad de árido reciclado para cada relación a_{ef}/c .

El máximo incremento de la porosidad se obtiene en hormigones con 100% de árido grueso reciclado y es cerca de un 42% superior a la del hormigón de referencia para las dos relaciones a_{ef}/c valoradas. Para sustituciones de 20 y 50% de árido reciclado el aumento de la porosidad se mueve en un rango entre el 6 y el 18% y entre 30 y 35%, respectivamente para relaciones a_{ef}/c 0,45 y 0,50.

Cuando los resultados a 28 días son observados respecto a la relación a_{tot}/c y a la resistencia a compresión del hormigón (Figura 8.2) se puede ver la tendencia lógica de esta propiedad y decir que la exigencia de la EHE-08 de una mínima relación a_{tot}/c de 0,45-0,50 para un ambiente marino de exposición es muy conservadora respecto a la porosidad del hormigón, sin embargo si se evaluá respecto a la resistencia a compresión, el límite recomendado por la instrucción (tabla 2.8.) parece ser muy ajustado, lo cual no resulta coherente.

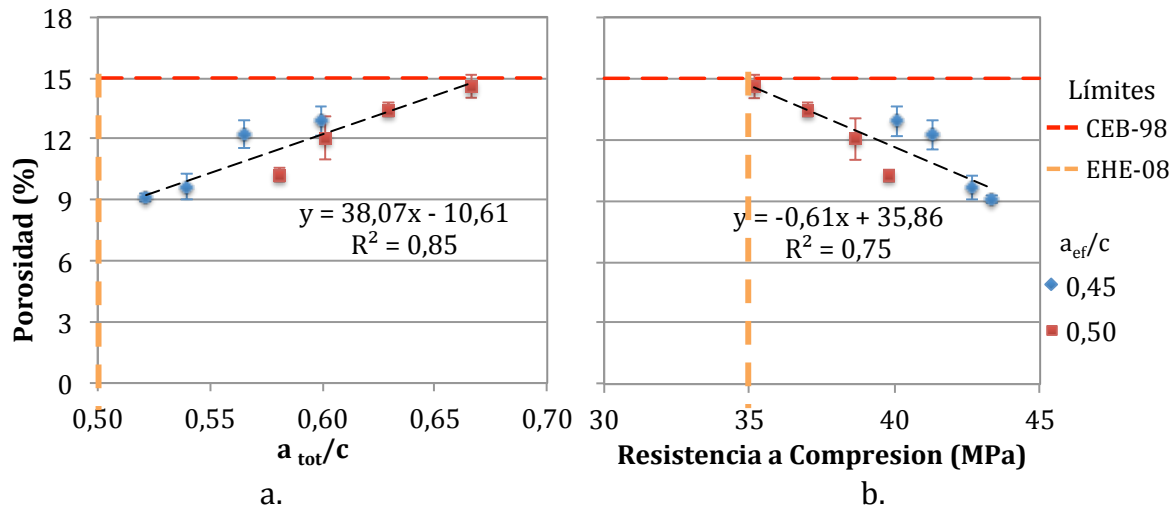


Figura 8.2. Porosidad a 28 días en los hormigones estudiados. a) Según la relación a_{tot}/c . b) según la resistencia a compresión.

En el caso de la norma EN_206-1 que establece la misma restricción de resistencia a compresión mínima en 35MPa para la zona de salpicaduras (ambiente IIIc ó XS3), los límites recomendados parecen vinculados. Se determina que los hormigones con árido reciclado estudiados en esta investigación con relación a_{ef}/c de hasta 0,50 cumplen los límites recomendados por la norma EN_206-1.

A medida que aumenta la edad del hormigón la porosidad disminuye, llegando a ser prácticamente igual para todos los hormigones cuando ha transcurrido un año (Figura 8.3). De acuerdo con Kou *et ál.* (2011), la porosidad presenta una mayor reducción en el tiempo para hormigones reciclados que para hormigones con árido natural. Llegando a disminuir un 37,3 y 28,1% para sustituciones del 100% de árido reciclado, frente a un 18,2 y 12,1% de un hormigón con árido natural, para relaciones a_{ef}/c de 0,45 y 0,50 respectivamente.

En general, el uso de áridos reciclados de hormigón (ArH) afecta significativamente la porosidad en el hormigón, pero permite obtener un hormigón que cumple con los límites recomendados para las relaciones a/c estudiadas.

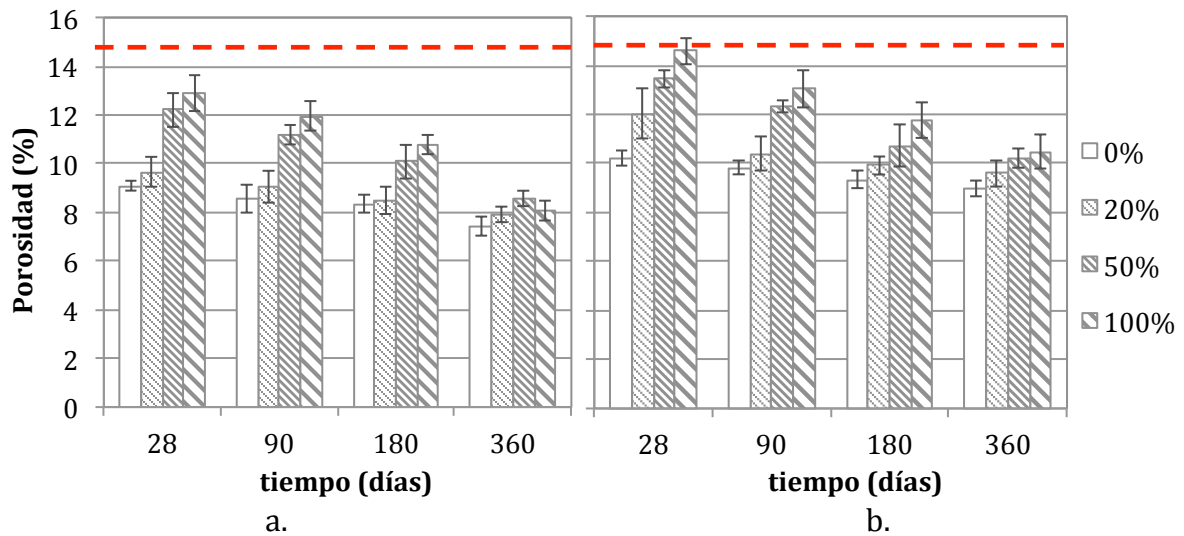


Figura 8.3. Porosidad de hormigones a distintas edades y con diferente cantidad de árido reciclado. a) relación a_{ef}/c 0,45 y b) relación a_{ef}/c 0,50.

8.1.2 Permeabilidad

La permeabilidad al agua bajo presión es determinada a 28, 180 y 365 días para hormigones con porcentajes de sustitución de 20%, 50% y 100% de árido reciclado respecto al hormigón de control con árido natural (0%) para relaciones de a_{ef}/c 0,45 y 0,50. Además con el propósito de evaluar las tendencias sobre un hormigón de menor calidad se analizó una relación a_{ef}/c de 0,60 en un hormigón con 100% de árido reciclado a 28 días. En la Figura 8.4 se presentan los resultados de la penetración máxima de agua bajo presión a 28 días para los hormigones estudiados, señalando los límites establecidos por la norma EN 206 y la EHE (Ministerio de Fomento de España, 2008) para los ambientes IIIa, IIIb y IIIc, analizados en esta investigación.

Se ha observado que la relación a/c del hormigón influye sobre la permeabilidad, en todos los casos a mayor relación a/c mayor permeabilidad del agua en el hormigón.

Un aumento en la penetración de agua bajo presión fue observado para los hormigones con 100% de árido reciclado, sin embargo no es evidente que para hormigones con 20% y 50% la penetración aumente a mayor cantidad de árido

reciclado. Como se observa en la figura 8.1. la dispersión de los resultados obtenidos fue mayor para una sustitución de 100%, encontrando valores de penetración máxima de agua desde 30mm hasta 55mm para una relación a_{ef}/c 0,45. En general, el uso de áridos reciclados en hormigones con relaciones a_{ef}/c menor que 0,50 cumplen con la especificación de la instrucción de hormigón EHE para ambientes IIIa y IIIb, no obstante, para un ambiente IIIc ni siquiera el hormigón con árido natural cumplió el límite de 30mm de penetración máxima. Es importante aclarar que la instrucción EHE hace referencia a valores de relación a_{tot}/c , lo que significa una menor relación a_{ef}/c a la utilizada para este trabajo. Los valores de relación a_{ef}/c empleados en este trabajo se adaptan a la relación a_{ef}/c propuesta por la norma EN 206-1.

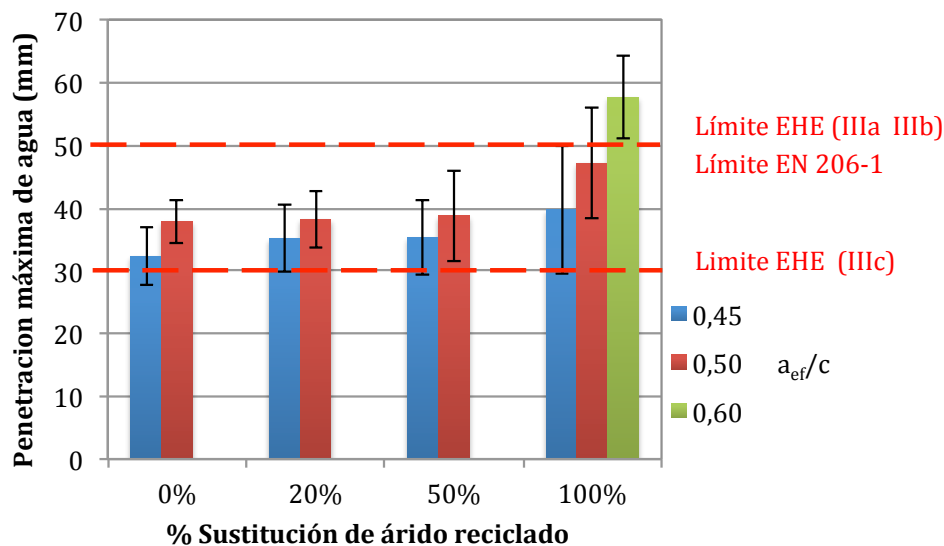


Figura 8.4. Resultados de penetración máxima de agua bajo presión a 28 días en hormigones con distintos contenidos de árido reciclado y relación a_{ef}/c .

Los resultados de penetración media de agua bajo presión siguen la misma tendencia (Figura 8.5). Aunque en este caso hormigones con hasta 50% de sustitución de árido reciclado cumplen los criterios de la EHE para ambientes IIIa, IIIb y IIIc con una relación a_{ef}/c de 0,45, mientras que para una relación a_{ef}/c de 0,50 solo hormigones con 0% y 20% de sustitución cumplen estos parámetros. El hormigón con a_{ef}/c 0,6 no cumple los límites establecidos por la EHE para penetración media ni máxima de agua bajo presión.

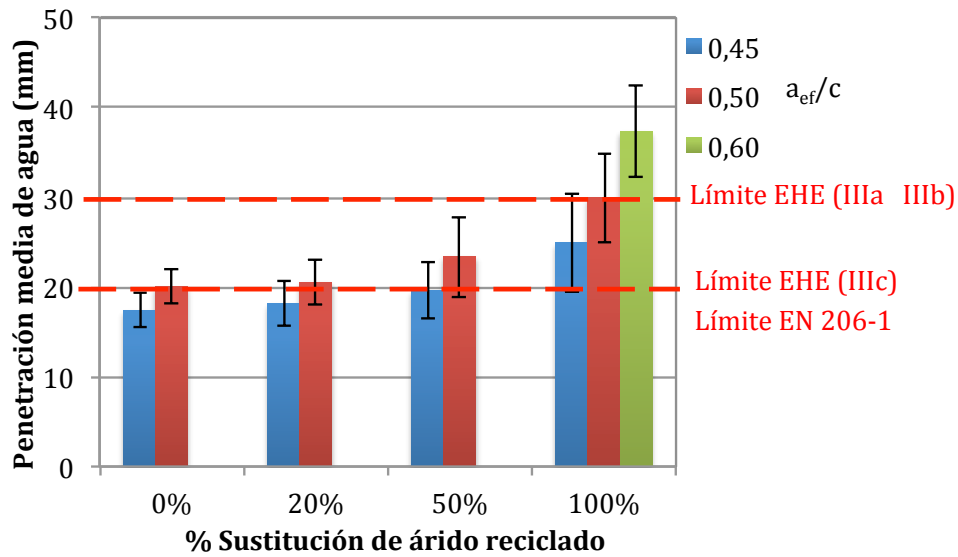


Figura 8.5. Resultados de penetración media de agua bajo presión en hormigones con distintos contenidos de árido reciclado a 28 días.

Se observó que para hormigones con 100% de árido reciclado la penetración de agua en las probetas en la mayoría de los casos tenía una forma más rectangular y uniforme (Figura 8.6), mientras que para el hormigón de control o incluso con 20% de árido reciclado, la mancha de agua observada presentó una figura más cónica.

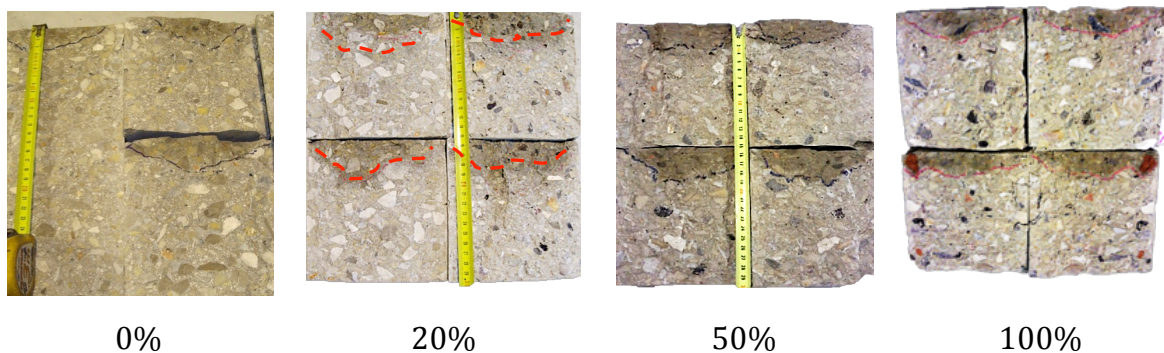


Figura 8.6. Probetas para lectura del ensayo de penetración de agua bajo presión de los hormigones estudiados con distintos contenidos de árido reciclado (0, 20, 50 y 100%).

Los resultados obtenidos muestran la permeabilidad máxima como el valor más restrictivo y en realidad es el más importante, ya que la estructura puede verse afectada en el momento en el que un agente agresivo alcanza la armadura aunque

sea solo en un punto, lo cual puede dar pie al periodo de inicio de la corrosión y por lo tanto generar daños por corrosión, poniendo en riesgo la estabilidad de la estructura.

Lopez-Gayarre *et ál.* (2011) encontró que la evaluación de permeabilidad al agua bajo presión en hormigones con árido reciclado según los procedimientos de la norma UNE-EN_12390-8:2009 no permitió establecer parámetros claros de comportamiento para clasificar un hormigón según su contenido de árido reciclado, sin embargo en este estudio (Figura 8.7) se ha determinado que el uso de 100% de árido reciclado puede disminuir la durabilidad del hormigón debido a la mayor relación a_{tot}/c que presentan.

En la Figura 8.7 se señalan los límites propuestos por la instrucción EHE-08 y la norma EN 206-1. Las dos coinciden en que la penetración máxima de agua bajo presión debe ser menor que 50mm, sin embargo al evaluar parámetros distintos para la relación a/c , se encuentra que la EHE-08 es también excesivamente conservadora respecto a esta propiedad, situando el límite de relación a_{tot}/c en 0,50 mientras la norma EN 206-1 presenta una recomendación más aproximada a la realidad y establece el mismo límite pero respecto a la relación a_{ef}/c , lo cual parece coherente con los resultados de la gráfica donde se señala el hormigón con máximo contenido de a_{tot}/c para una relación a_{ef}/c de 0,50 y se observa que cumple con las exigencias de la norma EN 206-1.

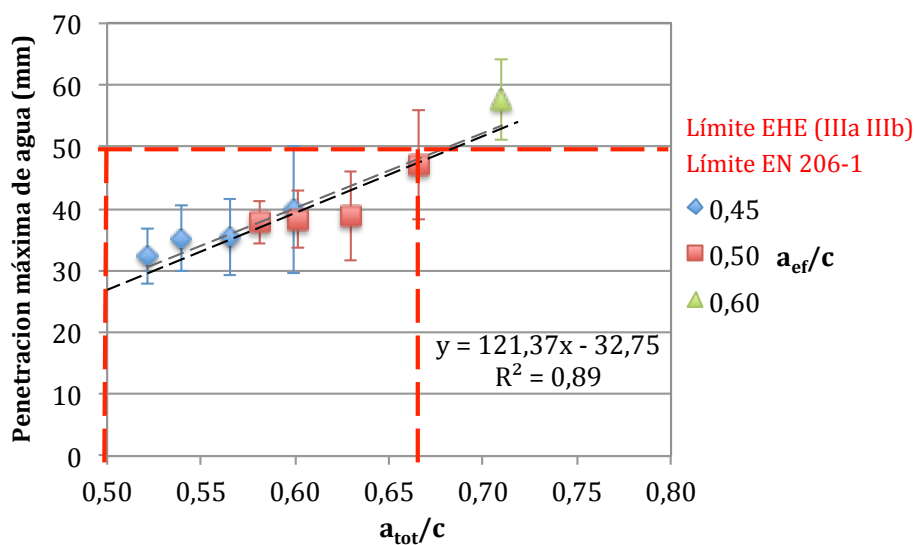


Figura 8.7. Penetración máxima de agua bajo presión a 28 días en hormigones según la relación a_{tot}/c .

Al aumentar la resistencia del hormigón la permeabilidad disminuye tal como se observa en la Figura 8.8. En general la permeabilidad en hormigones reciclados presenta un comportamiento similar para hormigones convencionales, como afirma también (Limbachiya *et ál.*, 2000).

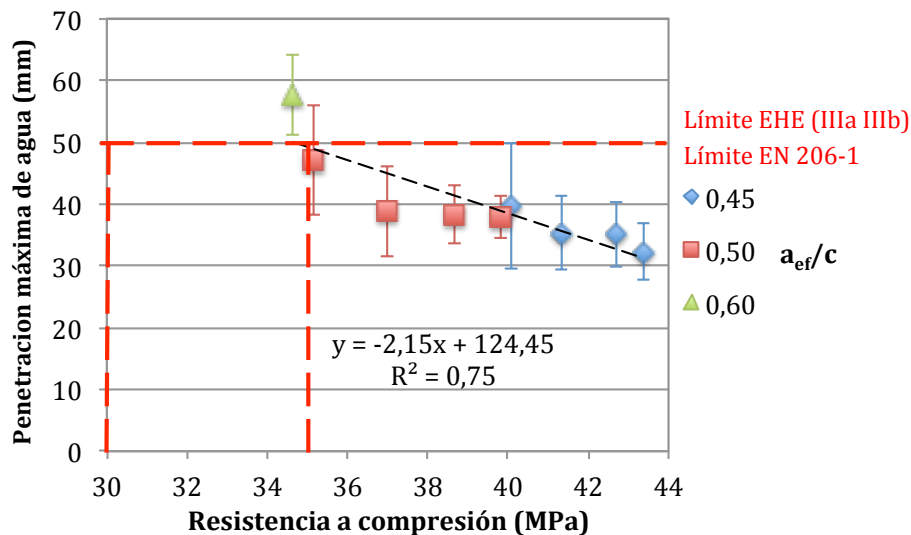


Figura 8.8. Penetración máxima de agua bajo presión según la resistencia a compresión del hormigón a 28 días.

Se observó que solo el hormigón con 0,60 de relación a_{ef}/c no cumple las recomendaciones propuestas. Respecto a las exigencia frente a la resistencia a compresión, la EHE-08 recomienda una mínima resistencia característica del hormigón de 35MPa para un hormigón con a_{tot}/c 0,45 y de mínimo 30MPa si la a_{tot}/c es de 0,50, sin embargo estos valores mínimos de resistencia son cumplidos con holgura y el limite para la penetración máxima a pesar de no cumplir el requisito de a_{tot}/c . La norma EN 206-1 establece como mínima clase resistente C30/37 o C35/45 para una relación a_{ef}/c de 0,50 y 0,45 respectivamente, de nuevo valores más coherentes con los resultados obtenidos. Los hormigones con árido reciclado cumplen con las especificaciones respecto a penetración de agua bajo presión establecidas en la norma EN 206-1.

A medida que la relación a_{ef}/c es mayor, el hormigón es más susceptible al contenido de áridos reciclados, llegando a superar los limites establecidos para penetración máxima y media a 28 días como se presento en el caso para un hormigón con 100% de árido reciclado y una relación a_{ef}/c de 0,6 (a_{tot}/c 0,71).

En términos de durabilidad el efecto del árido reciclado es mayor en hormigones de elevada relación a/c , por lo que se recomienda utilizar una relación a_{tot}/c no mayor que 0,60, de manera que se limite el ingreso y movimiento de sustancias agresivas en el hormigón. Utilizar hormigones con baja relación a/c , permite asegurar una baja permeabilidad del hormigón con árido reciclado. De acuerdo con (Pryce-Jenkins, 2011) cuando la calidad de la pasta nueva es buena, el uso de áridos reciclados de hormigón tiene una menor influencia.

En la Figura 8.9 y Figura 8.10 se presentan los resultados de la penetración de agua máxima y media, respectivamente, de los hormigones con árido reciclado para distintas edades y con relaciones a_{ef}/c 0,45 y 0,50. Los resultados promedio de penetración de agua indican que hormigones con relación a_{ef}/c 0,45 y 0,50 sin importar el grado de sustitución de árido reciclado, en todos los casos cumple las condiciones de impermeabilidad al agua exigidas por la EHE para los ambientes IIIa y IIIb. No se observó un patrón de comportamiento para esta propiedad, sin embargo a medida que incrementa la edad los resultados tienden a igualarse para todos los hormigones.

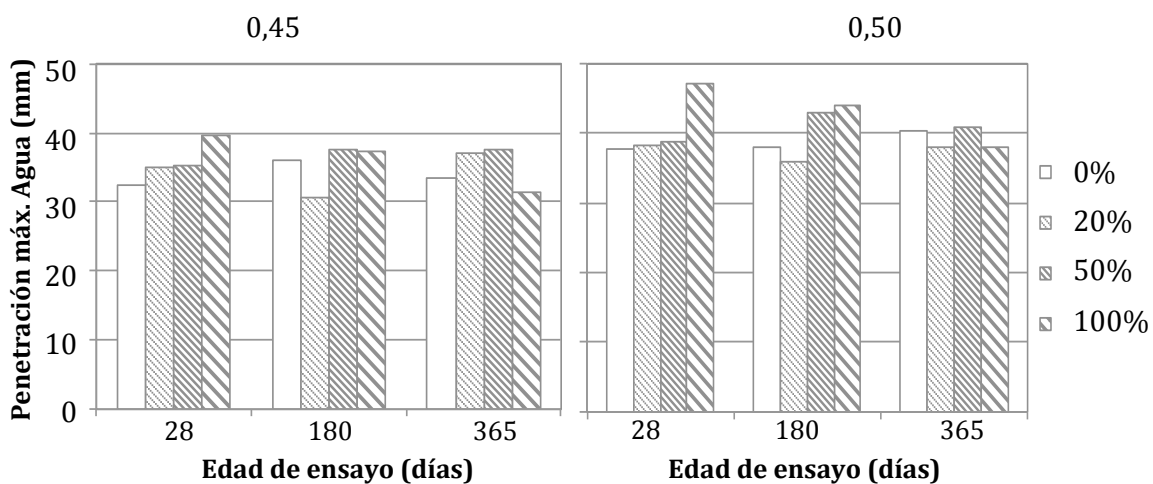


Figura 8.9. Evaluación de la penetración máxima de agua bajo presión en hormigones con árido reciclado a distintas edades, según la relación a_{ef}/c .

Respecto a la evolución de esta propiedad con la edad, no se encuentra gran sensibilidad, no existe una tendencia de comportamiento a largo plazo, pero en ningún caso el hormigón con árido reciclado superó el límite (50mm) por la máxima penetración de agua.

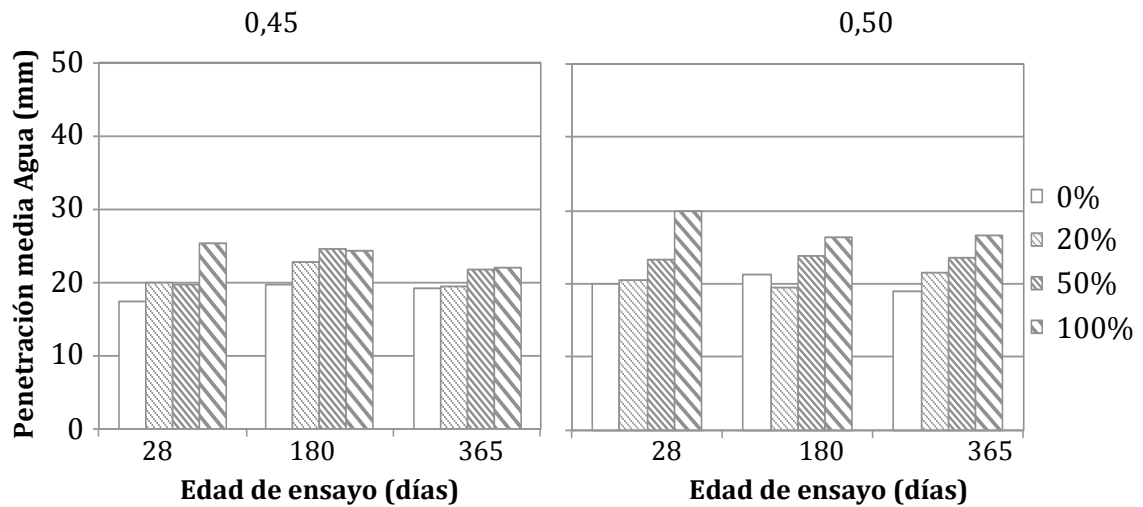


Figura 8.10. Evaluación de la penetración media de agua bajo presión en hormigones con árido reciclado a distintas edades, según la relación a_{ef}/c .

La rotura observada en el ensayo de tracción indirecta sobre las probetas utilizadas para el ensayo de permeabilidad muestra que el árido reciclado y específicamente el mortero adherido, no es necesariamente el punto de fallo (Figura 8.11).

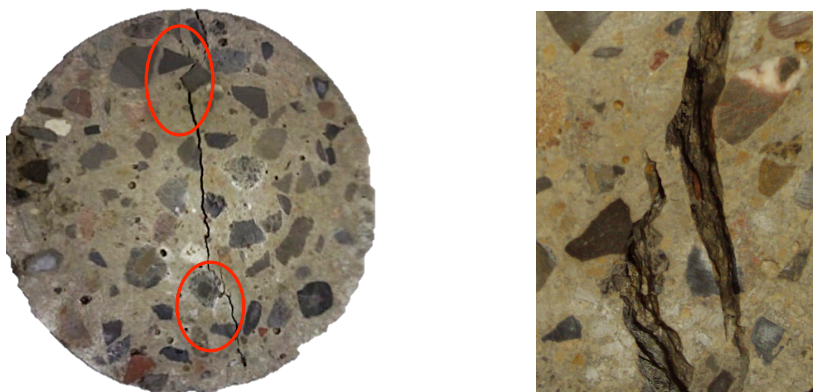


Figura 8.11. Probeta sometida a tracción indirecta para lectura de la profundidad de agua bajo presión.

8.1.3 Absorción Capilar

Se determina la absorción o succión capilar a 28 y 90 días de hormigones con relación a_{ef}/c de 0,45 y 0,50, para porcentajes de sustitución de 20%, 50% y 100% de árido reciclado respecto al hormigón de control con árido natural (0%) para caracterizar la estructura de poros como un indicador de durabilidad. Para cada hormigón fueron preparadas 3 probetas como se describió en el apartado 5.4.3.

En la Figura 8.12 se presentan las curvas obtenidas durante el ensayo para los hormigones con 90 días, siguiendo el procedimiento de la norma UNE 83966-08, donde cada curva corresponde a la media de tres muestras ensayadas. Las curvas para los hormigones reciclados presentan un comportamiento similar, ligeramente por encima respecto a la curva de hormigón con árido natural 0%. Para el caso de hormigones con relación a_{ef}/c 0,50 además de mayores valores de absorción de agua para todos los casos respecto a los hormigones con a_{ef}/c 0,45, se observó una mayor dispersión en hormigones con 100% de árido reciclado. En la Figura 8.13 se presentan las curvas para los mismos hormigones, pero solo durante las primeras horas del ensayo, sobre las que se determina la pendiente de la recta obtenida por regresión lineal en el tramo de la gráfica que corresponde al agua absorbida respecto al tiempo para el estado 1, relacionado con el llenado de agua por absorción a través de los poros capilares como se describe en 5.4.3.

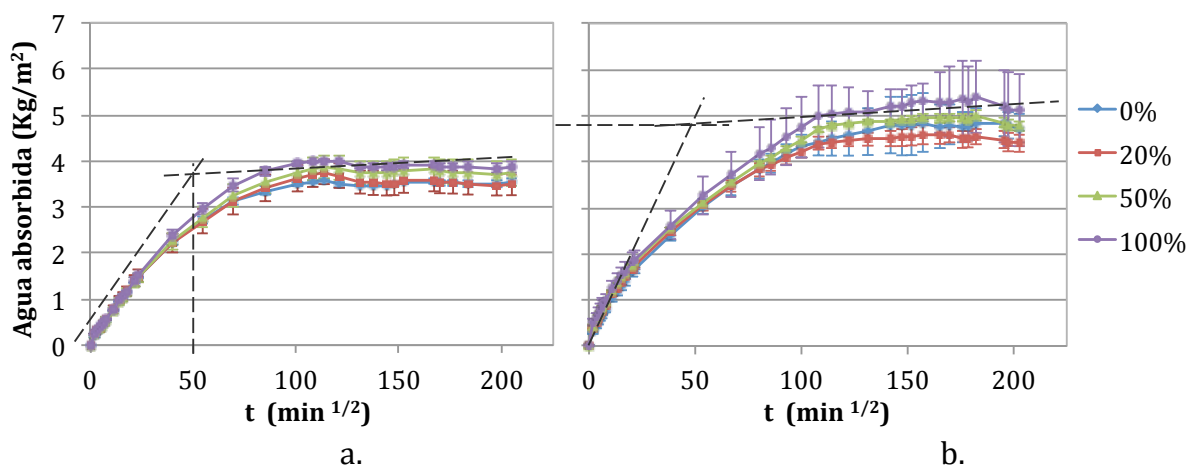


Figura 8.12. Absorción capilar de agua para hormigones con 90 días de edad. a) Hormigones con relación a_{ef}/c 0,45. b) Hormigones con relación a_{ef}/c 0,50

En la Figura 8.13.a. se observa que para el hormigón con menor relación a_{ef}/c 0,45 la absorción de agua es similar para todos los hormigones durante las primeras 9 horas, por ello las curvas casi se solapan, mientras en el Figura 8.13.b. donde se presenta el hormigón con mayor relación a_{ef}/c 0,50 ya se observan diferencias leves entre los hormigones según el porcentaje de sustitución de árido reciclado en la mezcla y una mayor cantidad de agua absorbida.

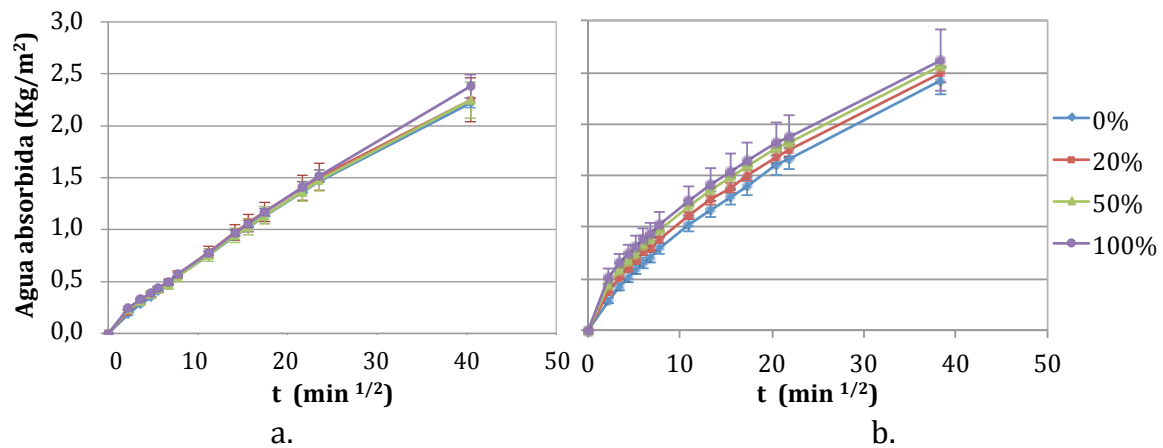


Figura 8.13. Resultados de las primeras 24 horas del ensayo de succión capilar en hormigones con 90 días de edad. a) Hormigones con relación a_{ef}/c de 0,45. b) Hormigones con relación a_{ef}/c de 0,50.

En la Figura 8.14 se presentan los resultados del coeficiente de succión capilar para hormigones con 28 y 90 días. Una mayor absorción capilar fue observada para hormigones con 50 y 100% de árido reciclado a 28 días, comportamiento que se puede atribuir a la mayor absorción del árido reciclado. Sin embargo, con el tiempo los valores se reducen llegando prácticamente a igualar los resultados del hormigón convencional a 90 días, por lo que la reducción del coeficiente de succión capilar es mucho mayor para hormigones con árido reciclado que para hormigones con árido natural.

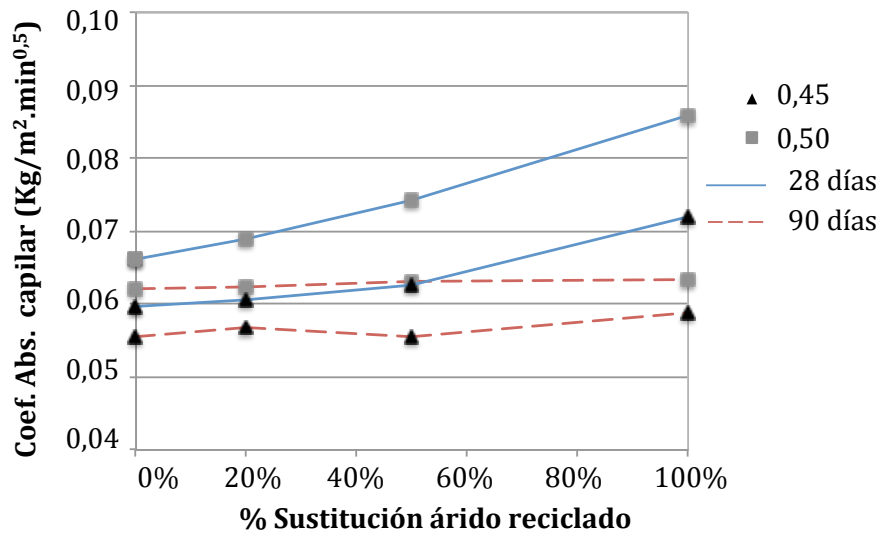


Figura 8.14. Coeficiente de absorción capilar para hormigones con relación a_{ef}/c de 0,45 y 0,50 con diferentes niveles de sustitución de árido reciclado, ensayados a 28 y 90 días.

En la Figura 8.15 se representa el cambio en los coeficientes de succión capilar, y se observa que para una sustitución del 20% de árido reciclado el incremento en el coeficiente no llega al 5% a 28 días, mientras que para los hormigones con 100% de árido reciclado y relación a_{ef}/c 0,45 y 0,50, llega a aumentar hasta 21 y 30% respectivamente. Respecto al incremento del coeficiente de succión capilar a 90 días en hormigones con 100% de árido reciclado, éste solo llega a ser un 6% mayor respecto al hormigón con árido natural. Cuando se compara la disminución del coeficiente a 90 días respecto a los resultados de cada uno a 28 días, se observa como la disminución, o el mejoramiento en el coeficiente de los hormigones con árido reciclado es mayor. A 90 días el hormigón con 100% de árido reciclado mejora su coeficiente hasta un 26% respecto a los resultados obtenidos a 28 días, mientras que el hormigón con árido natural solo mejora o disminuye su coeficiente un 6%.

En la Figura 8.16 se presentan los resultados obtenidos de esta investigación y algunos encontrados en la bibliografía para el coeficiente de succión capilar evaluado a 28 días y se observa que en general las tendencias son similares. A medida que aumenta el contenido de árido reciclado, el coeficiente de succión capilar aumenta.

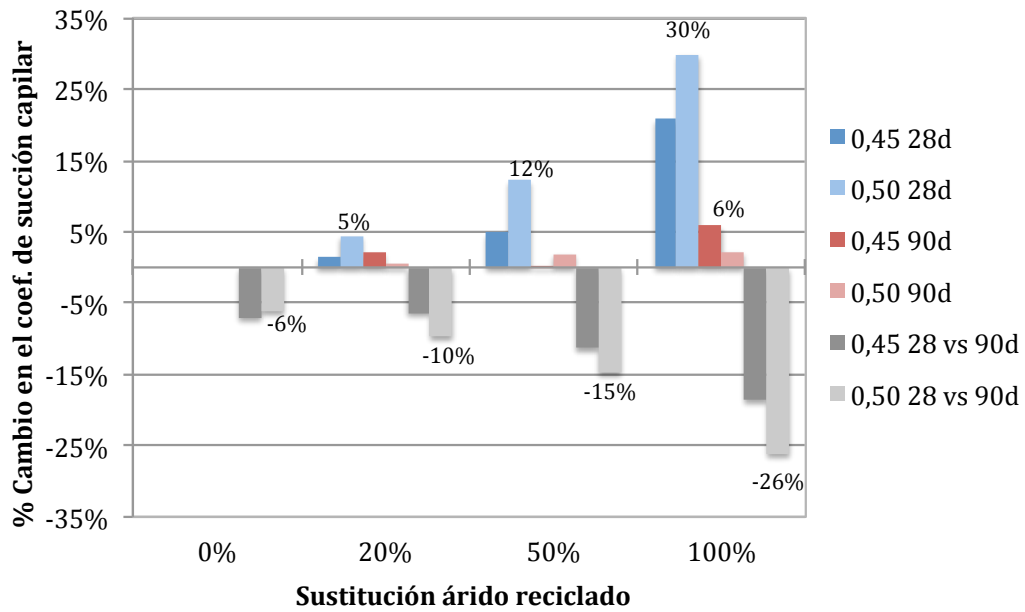


Figura 8.15. Cambio en el coeficiente de succión capilar para los hormigones de estudio a 28 y 90 días.

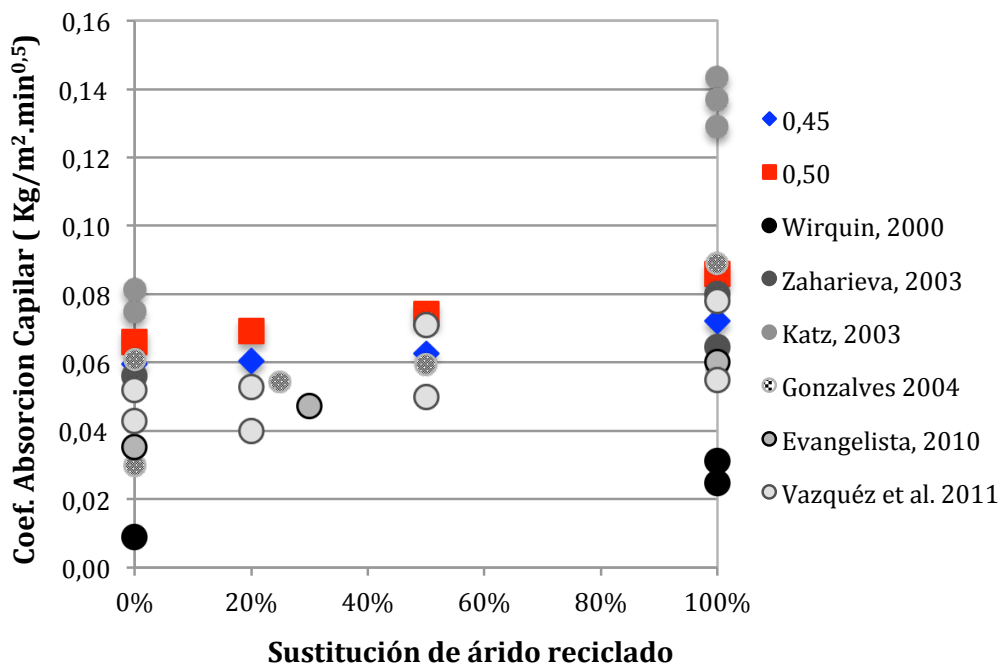


Figura 8.16. Coeficiente de absorción capilar a 28 días, para distintos hormigones con árido reciclado.

La mayor cantidad de árido reciclado en el hormigón incrementa la relación a_{tot}/c , lo cual va acompañado de un incremento del coeficiente de absorción capilar (Figura 8.17). Al evaluar el coeficiente a distintas edades, los resultados confirman que para hormigones con árido reciclado el coeficiente de succión disminuye con el tiempo, llegando a igualar el coeficiente del hormigón con áridos naturales coincidiendo con (Olorunsogo, 2002).

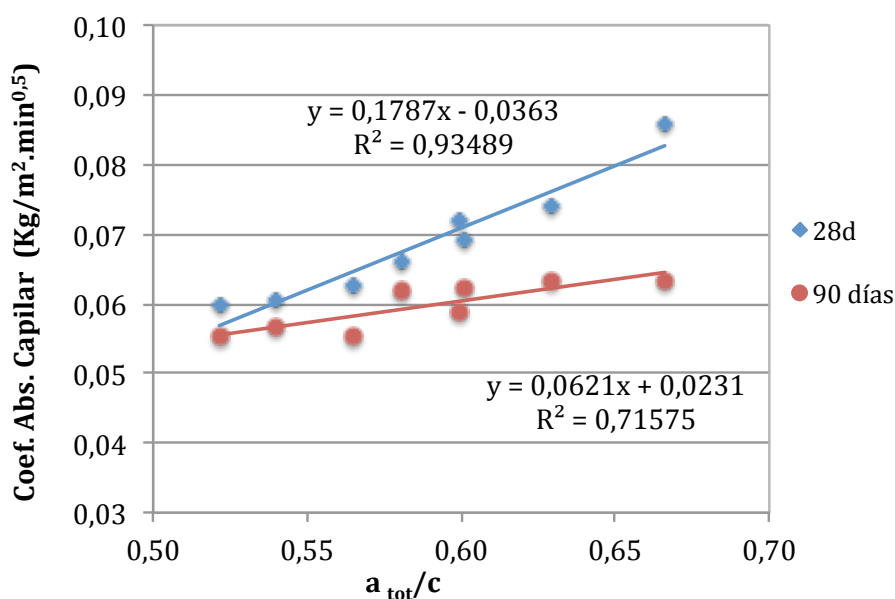


Figura 8.17. Tendencia del coeficiente de succión capilar según la relación a_{tot}/c del hormigón y la edad de ensayo.

Para el caso del hormigón con a_{ef}/c 0,45 el ensayo se llevo a cabo dos veces, uno realizando el secado de las probetas a 50°C como recomienda la norma (UNE-83966, 2008) y otro con el secado a 110°C. Para este último caso fueron obtenidos valores de coeficiente de absorción capilar que duplican los obtenidos cuando la temperatura fue la normalizada. La exposición de las probetas a una mayor temperatura durante el secado, pudo generar un cambio en el punto de saturación de agua, viéndose reducidos los tiempos, y llevando a un aumento sustancial de los resultados de absorción capilar, lo cual indica una mayor porosidad del material. La susceptibilidad del hormigón con árido reciclado frente a altas temperaturas (> 60°C), debería ser estudiada para validar los resultados de algunos ensayos y su comportamiento frente al fuego.

Analizadas las propiedades de porosidad, permeabilidad y absorción capilar se puede concluir que el comportamiento frente a la durabilidad de los hormigones estudiados cumple con las recomendaciones normativas incluso hasta con una relación a_{ef}/c de 0,50 y un 100% de árido reciclado grueso. Aunque la EHE presenta sus recomendaciones para un hormigón con a_{tot}/c 0,50 en este trabajo un hormigón con a_{tot}/c de hasta 0,67 cumple con las solicitudes de penetración máxima, y aunque no existen en la EHE recomendaciones para propiedades como la porosidad y la absorción capilar, es posible afirmar que dentro de los valores encontrados en la bibliografía se considera que el hormigón reciclado con una relación a_{ef}/c de hasta 0,50 presenta un comportamiento adecuado.

En general las propiedades del hormigón reciclado mejoran con la edad, pero en cualquier caso la calidad del hormigón es definitiva para su durabilidad, por lo que se debe garantizar una dosificación, fabricación y mantenimiento adecuados para las solicitudes propias del proyecto.

8.2 Análisis del transporte de Cloruros en el hormigón con áridos reciclados de RCD

Tal como se estableció en el estado del arte numerosos factores como el curado, la compactación, la relación a/c , el contenido y el tipo de cemento, el tiempo de exposición, la concentración de cloruros, la temperatura y la humedad influyen en la velocidad de penetración de cloruros.

En este estudio, además del efecto que puede tener el uso de áridos reciclados en el hormigón, se analiza el efecto de la relación a/c y el tiempo.

Dos metodologías de ensayo son empleadas en esta sección para determinar el coeficiente de difusión de cloruros “D” como parámetro que caracteriza la resistencia a la penetración de cloruros en el hormigón:

Un método de migración con el que hormigones con árido reciclado de hormigón (ArH) y árido reciclado mixto de hormigón (ArMh) fueron analizados a 7, 30 y 365 días frente a un hormigón con áridos naturales (0%).

Asimismo un análisis por difusión natural de los cloruros en el hormigón sometido a un ambiente agresivo de agua de mar artificial, fue realizado para evaluar la resistencia a la penetración de cloruros en hormigones con relación a_{ef}/c 0,45 y 0,50 con porcentajes de sustitución 0%, 20%, 50% y 100% de árido reciclado. En la Tabla 8.1 se resumen los hormigones evaluados por cada metodología según el tipo de árido, el porcentaje de sustitución y la relación a_{ef}/c .

Tabla 8.1. Variables analizadas sobre los hormigones para la determinación de la resistencia a la penetración de cloruros.

Ensayo de Cloruros	Tipo de árido	a_{ef}/c	% de sustitución	Edad de ensayo	
Migración	AN	0,40- 0,50	0%	7, 30 y 365 días	
	ArH	0,40-0,45- 0,50 -0,60	50%, 100%	7, 30 y 365 días	
	ArMh	0,35-0,40- 0,50	100%	7, 30 días	
Difusión	I/S	AN	0,45-0,50	0%	
		ArH	0,45-0,50-0,60	100%	365 días
	IC	AN	0,45-0,50	0%	365 días
		ArH	0,45-0,50	100%	

AN: árido natural

ArH: árido reciclado de hormigón

ArMh: árido reciclado mixto de hormigón

I/S : en condiciones de inmersión secado

IC: en condiciones de inmersión continua

a_{ef}/c en negrita han sido evaluadas para todas las edades en el ensayo de migración.

8.2.1 Análisis por el método de migración de cloruros

Fue utilizado el método de ensayo descrito en la norma UNE 83987:2009, como un ensayo de migración poco agresivo que representa el fenómeno que ocurre en el

hormigón frente a la difusión. En este apartado se presentan los resultados del coeficiente de difusión obtenidos para el estado no estacionario “Dns” y el estacionario “Ds” en hormigones con árido reciclado de hormigón (ArH) y árido reciclado mixto de hormigón (ArMh), tomando como referencia un hormigón con árido natural (AN). El programa experimental fue descrito en la tabla 4.6. El procedimiento de ensayo fue presentado con detalle en el apartado 5.4.4.1. de técnicas experimentales.

En la Figura 8.18 se presentan algunas curvas obtenidas con los datos tomados durante el ensayo para hormigones a la edad de 7 días. Las curvas en color rojo corresponden a hormigones con 100% árido reciclado mixto de hormigón (ArMh) y se ubican en la parte superior de la grafica, lo que significa que presentan mayores valores de conductividad que permiten el paso a una mayor cantidad de iones y por lo tanto presentan un mayor coeficiente de difusión como se verá más adelante. Las líneas de color verde corresponden a hormigones con 100% de árido reciclado de hormigón (ArH) y en azul las del hormigón con árido natural (AN). En la figura también se representa el tiempo de paso “ τ ” para cada hormigón, que corresponde al tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo hasta que se alcanza un flujo constante de iones cloruro desde el catolito donde está la solución de cloruros, al anolito que inicialmente no los tiene.

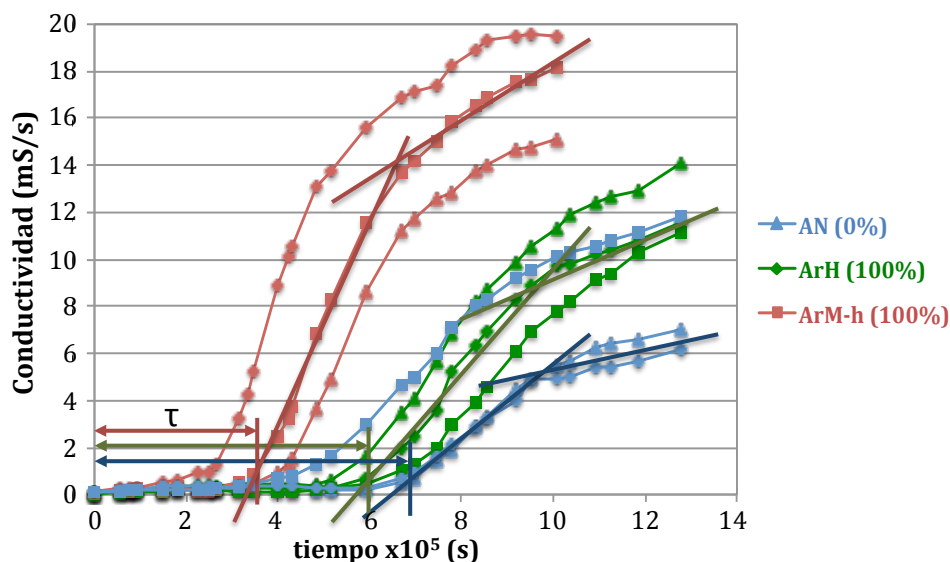


Figura 8.18 Curvas obtenidas en el ensayo, sobre la evolución de la conductividad media en el tiempo para hormigones con 7 días.

En la Figura 8.19 se presenta el tiempo de paso para los distintos hormigones evaluados a 30 días y se hace evidente que el uso de áridos reciclados mixtos de hormigón ArMh y mayores relaciones a/c, dan pie a menores tiempos de paso (τ). Indicando un periodo más corto para el estado no estacionario, es decir, que termina el enlace de cloruros por las fases solidas de la pasta de cemento, alcanzando condiciones de flujo constante de iones cloruro. Cuando se utilizan áridos reciclados de hormigón ArH, el factor más influyente es la relación a/c. En este caso si la relación a_{ef}/c es baja (0,4) el tiempo de paso puede ser el mismo que para los hormigones con árido natural, pero si la relación a_{ef}/c aumenta (0,5), el hormigón con ArH se hace más susceptible al paso de iones y el tiempo de paso se ve disminuido.

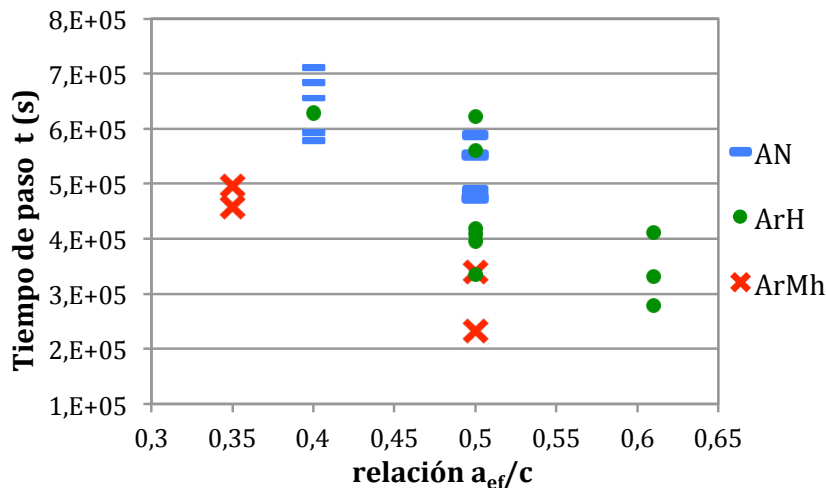


Figura 8.19. Tiempo de paso en segundos para hormigones con distintos tipos de árido reciclado y relación a/c, ensayados a 30 días.

En las Figura 8.20, Figura 8.21, Figura 8.22, se presentan los coeficientes de difusión de cloruros en estado no estacionario D_{ns} , según la relación a_{tot}/c y a_{ef}/c para cada edad estudiada. Las gráficas se presentan separadas según la edad de ensayo para observar mejor lo que ocurre a corto y medio plazo, donde se observa como tendencia que el coeficiente D_{ns} es mayor a medida que aumenta la relación a/c influenciado también por el tipo de árido empleado. Por otro lado, el coeficiente D_{ns} a largo plazo evaluado para hormigones con árido natural y árido reciclado (ArH), no presenta grandes diferencias entre los hormigones ensayados, de hecho puede decirse que los valores de D_{ns} casi se igualan para hormigones con

árido natural y árido reciclado de hormigón, llegando a solaparse (Figura 8.22) por lo que más adelante son presentados en diagramas de barras.

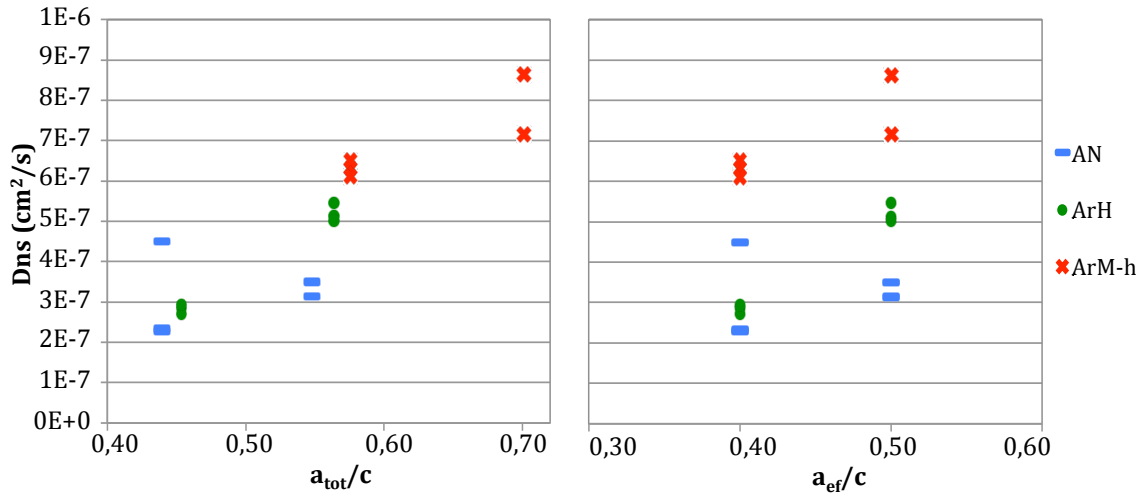
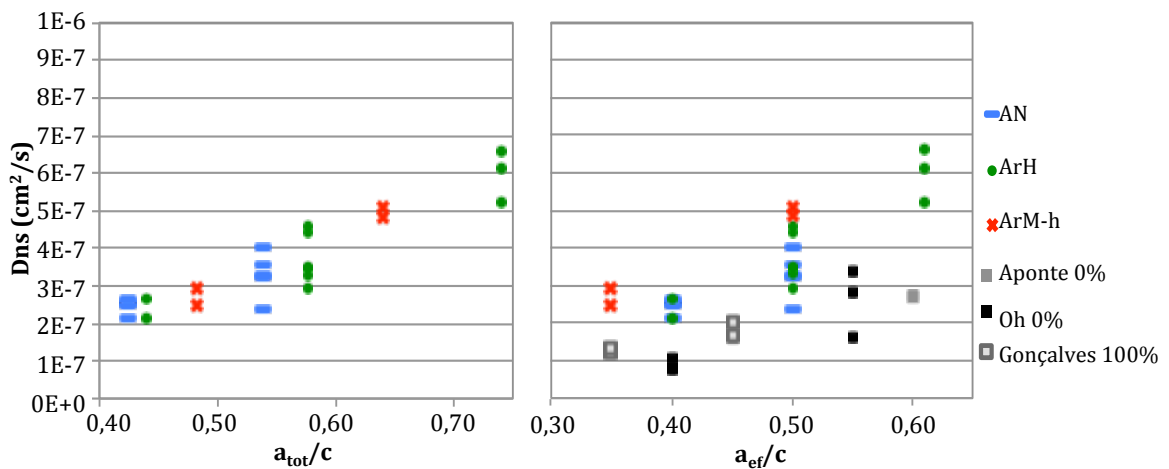


Figura 8.20. Coeficiente de difusión de Cloruros en estado no estacionario (D_{ns}) según la relación a_{tot}/c y a_{ef}/c para hormigones analizados a 7 días.



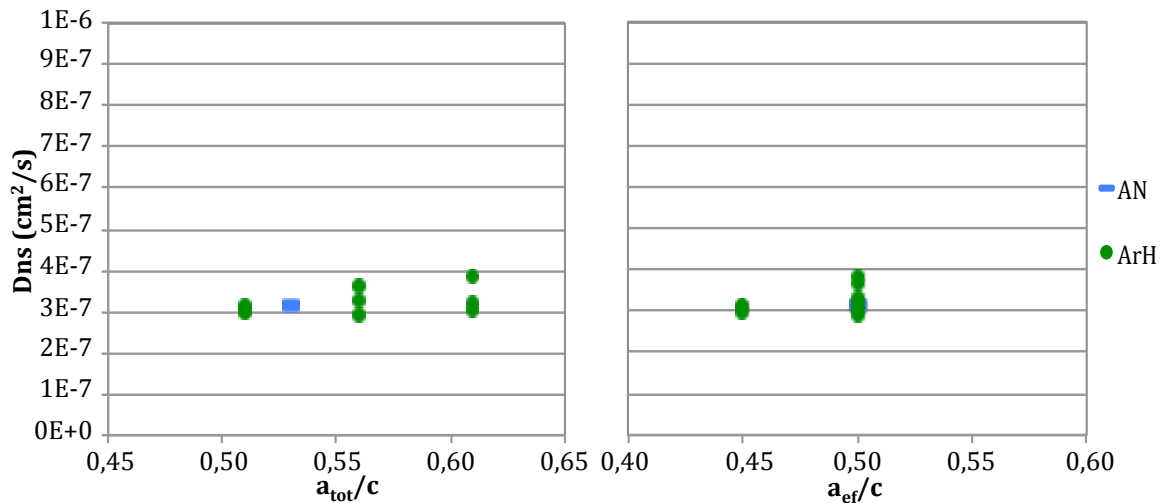


Figura 8.22. Coeficiente de difusión de Cloruros en estado no estacionario (D_{ns}) según la relación a_{ef}/c para hormigones analizados a 365 días (largo plazo).

Sobre la velocidad de penetración de cloruros influyen diversos factores, entre ellos la edad, la relación a/c o la cantidad y el tipo de cemento. Los resultados obtenidos para el coeficiente de difusión de cloruros en estado no estacionario a 30 días (Figura 8.21), son mayores que los encontrados para hormigón convencional en la bibliografía (Aponte, 2010), (Oh, 2003), pero sigue una tendencia similar a medida que aumenta la relación a/c del hormigón.

En el caso del coeficiente de difusión para el estado no estacionario D_{ns} , los resultados obtenidos equivalen a 10 veces más que para el caso del coeficiente de difusión en estado estacionario D_s . En el estado no estacionario el coeficiente considera tanto el transporte de iones a través del hormigón como la retención de estos por la pasta, mientras que para el Coeficiente en estado estacionario D_s considera solo el flujo de iones, las reacciones físicas y químicas que se presentan con el tiempo en el hormigón hacen que el paso de los iones se haga más difícil y por lo tanto que el coeficiente sea menor.

Se presentan los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos en estado estacionario D_s (Figura 8.23 y Figura 8.24 y Figura 8.25), según la relación a_{tot}/c y a_{ef}/c , para cada edad estudiada. Al igual que para D_{ns} las gráficas se presentan separadas según la edad de ensayo.

En la Figura 8.23 se presentan los valores del coeficiente de difusión en estado estacionario para hormigones ensayados a 7 días respecto a la relación a_{tot}/c y a_{ef}/c . Se encontró que de la misma manera que para el estado no estacionario el tipo de árido y la relación a/c , tienen una gran influencia sobre los resultados a corto plazo. Los hormigones fabricados con árido reciclado mixto de hormigón (ArMh), presentan valores de coeficiente de difusión de cloruros por encima de los coeficientes para un hormigón con árido reciclado de hormigón y con árido natural.

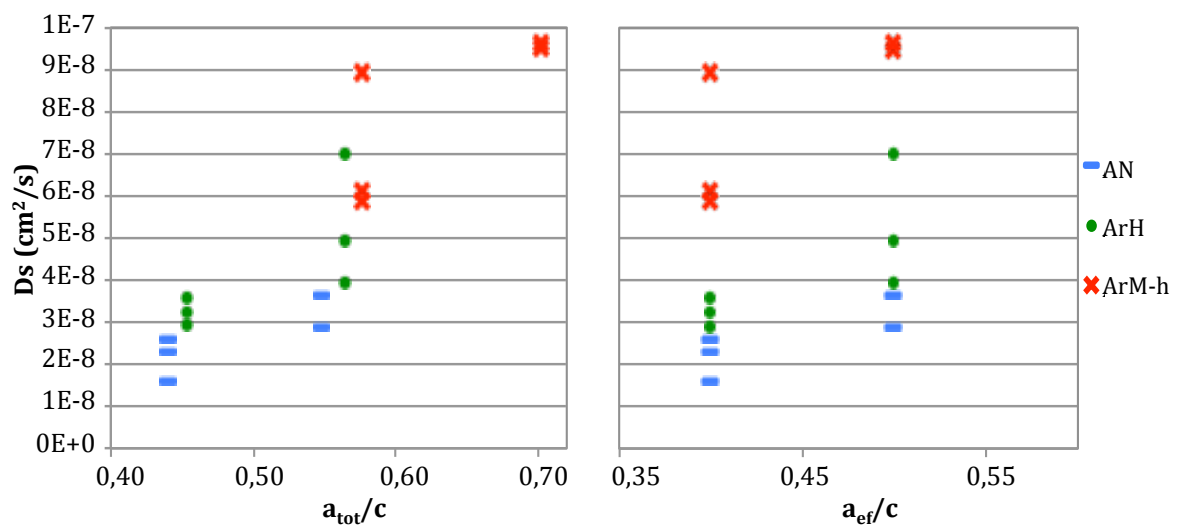


Figura 8.23. Coeficiente de difusión de Cloruros en estado estacionario (D_s) según la relación a/c para hormigones ensayados a 7 días (corto plazo).

En la Figura 8.24, se presentan además de los resultados obtenidos para el coeficiente de difusión en estado estacionario D_s a 30 días, los resultados de la bibliografía que muestran una tendencia similar (Qin, Zhao *et ál.*, 2011), aunque en realidad los resultados no puedan ser del todo comparables al tratarse de metodologías de ensayo distintas, lo cual como se presentó en el estado del arte tiene una influencia significativa en los resultados. Se puede decir que los valores obtenidos se encuentran por debajo de $7 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$, donde se encuentran la mayoría de los datos presentados por Xiao *et ál.* (2012) respecto a los valores de D_s en la figura 2.31 (pag. 2-63). Por otro lado se incluyen también los resultados de Aponte (2010) que utiliza la misma metodología de ensayo que el presente trabajo, para evaluar hormigones con árido natural por lo que sus resultados sirven como referencia frente al hormigón de control.

Al evaluar el coeficiente de difusión en hormigones de un año de edad (Figura 8.25), se observa que éste tiene un rango de valores más próximos, y que para una relación a_{tot}/c cercana a 0,5 los hormigones con árido natural y árido reciclado, pueden presentar el mismo valor de D_s .

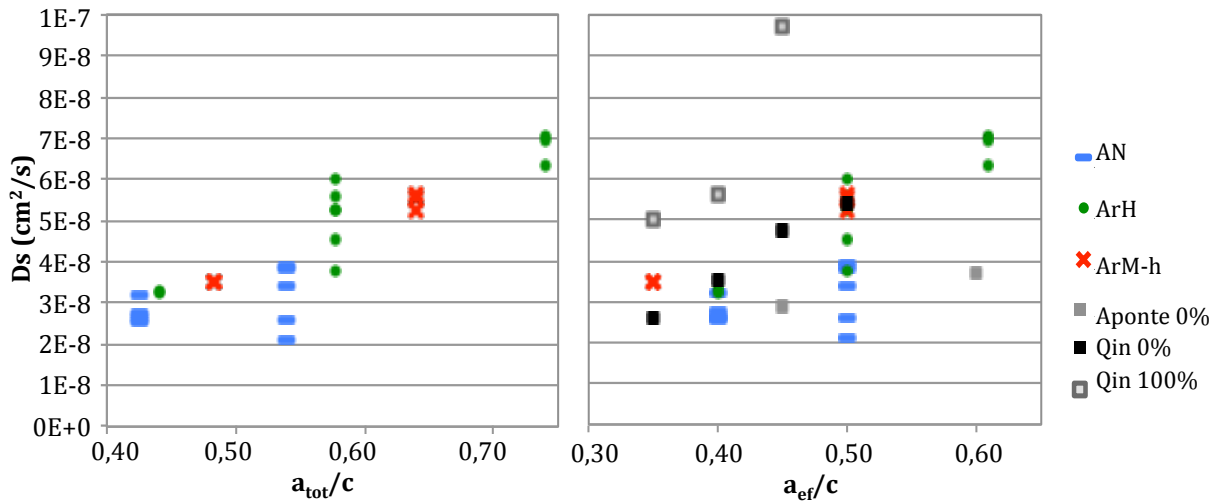


Figura 8.24. Coeficiente de difusión de Cloruros en estado estacionario (D_s) según la relación a/c para hormigones ensayados a 30 días (medio plazo).

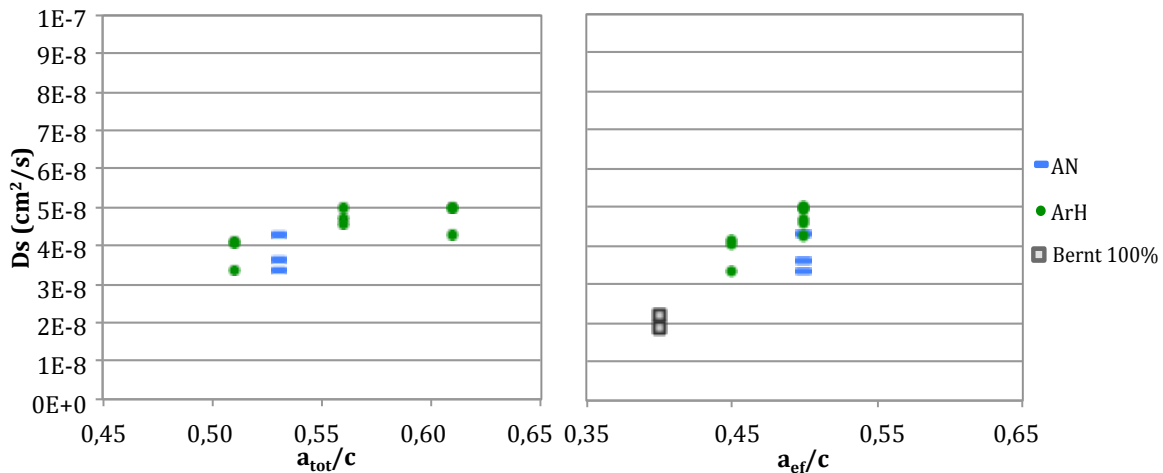


Figura 8.25. Coeficiente de difusión de Cloruros en estado estacionario (D_s) según la relación a/c para hormigones analizados a un año (largo plazo).

Los valores presentados en esta investigación, son coherentes con los presentados por (Berndt, 2009) y (Qin *et ál.*, 2011) aunque ellos utilizaron una metodología

diferente. Berndt, utiliza áridos reciclados con 4,4% de absorción, y fabrica el hormigón con los áridos en condiciones de saturado superficie seca. para la evaluación del coeficiente de difusión de cloruros, sigue la metodología propuesta en la norma ASTM 1556 en condiciones de difusión natural, sobre hormigones expuestos a un ambiente marino durante un año, utiliza además escorias en distintas proporciones para los hormigones estudiados, lo que le permite obtener bajos valores de coeficiente de difusión. Por su parte Qin, con áridos reciclados de 5,5% de capacidad de absorción, introducidos en la mezcla también en condición saturada superficie seca, utiliza el método desarrollado en University of Cape Town (Streicher, 1996), aplicando sobre las muestras una corriente de 10V en una solución de cloruro de sodio 5M NaCl. Los resultados son presentados, sin embargo se considera como referencia el hormigón utilizado en esta investigación como hormigón con áridos naturales.

Respecto al análisis de los resultados Aponte considera que en el caso del coeficiente D_s , donde sólo se tiene en cuenta la estructura porosa, se observa una mejor relación frente a la resistencia a compresión, mientras que para el coeficiente de difusión no estacionario D_{ns} se tiene en cuenta la fijación de cloruros además de la estructura porosa de la matriz del hormigón, generando que el coeficiente dependa de muchos más factores que una propiedad masiva como lo es la resistencia a compresión (Aponte, 2010), por lo cual en este caso se realiza su evaluación frente a la relación a_{tot}/c .

En general se observa una tendencia más clara sobre la influencia de la relación a/c respecto al agua total en el hormigón y la edad. Los coeficientes tienden a igualarse a largo plazo (1 año), mientras que a corto plazo (7 días) las diferencias son muy importantes, de ahí la importancia de una adecuada ejecución.

Se observan en las Figura 8.26 y Figura 8.27 los resultados de los coeficientes de difusión respecto a la resistencia a compresión tanto para el estado estacionario como el no estacionario, en estas gráficas el objetivo es analizar de forma global el comportamiento de los coeficientes de difusión con respecto a la edad. Las líneas de tendencia evidencian como los coeficientes intentan igualarse con el tiempo para todos los hormigones, lo que conduce a afirmar que en el caso del hormigón reciclado, la resistencia a la penetración de cloruros en el hormigón aumenta con la

edad, lo cual puede deberse al sellado de los poros, por los fenómenos físicos y químicos que se generan en la pasta.

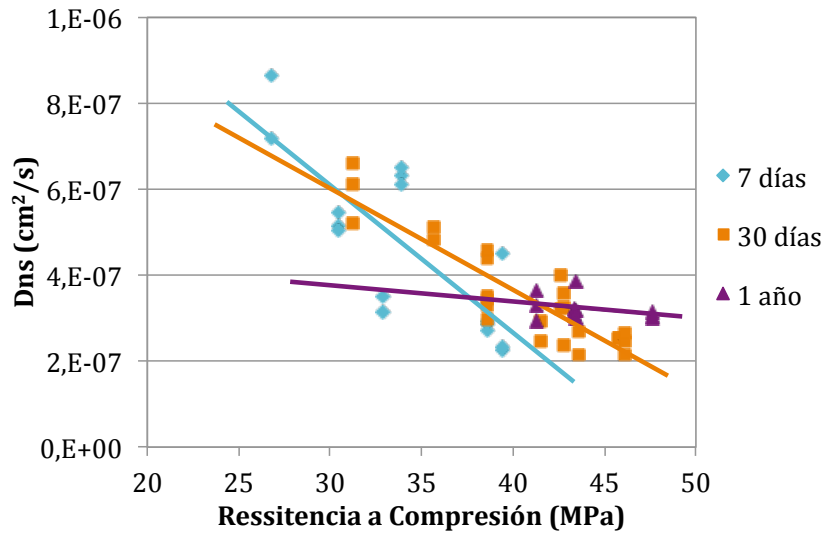


Figura 8.26. Coeficiente de difusión en estado no estacionario D_{ns} a 7 días, 30 días y 1 año, según la resistencia a compresión del hormigón.

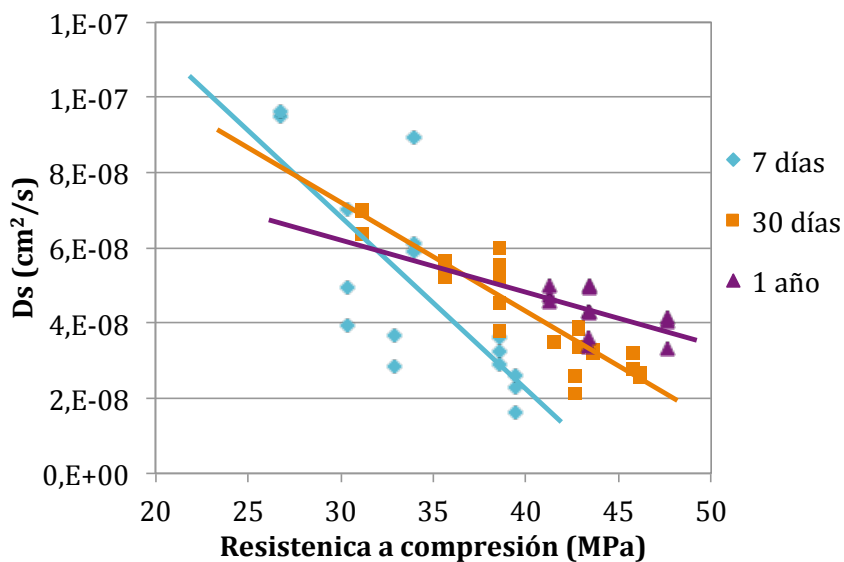


Figura 8.27. Coeficiente de difusión en estado estacionario D_s a 7 días, 30 días y 1 año, según la resistencia a compresión del hormigón.

La tendencia es similar tanto para el estado no estacionario como el estacionario y la pendiente de la línea de tendencia es más inclinada para 7 días (corto plazo), hasta llegar a una línea de tendencia casi recta en el caso del coeficiente de difusión D_{ns} para los hormigones evaluados a 365 días (largo plazo). Es importante recordar que los resultados a largo plazo corresponden solo a hormigones con árido natural AN y árido reciclado de hormigón ArH con 50% y 100% de sustitución, que además han presentado valores de resistencia a compresión a 1 año muy similares.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de difusión de cloruros puede ser una herramienta válida para estimar la vida útil de servicio de las estructuras, ya que permite evaluar el tiempo de inicio de corrosión, es importante considerar el hecho de que el coeficiente de difusión disminuye con la edad. Por lo tanto, si este efecto no se considera, la predicción de la vida útil del hormigón armado puede verse sesgada (Andrade *et ál.*, 2011). Efectos como la disminución o sellado de los poros debido a la posible aparición de sal de Friedel y el enlace de los cloruros a las fases de cemento hacen posible este fenómeno.

Como se ha visto en los resultados presentados, los valores para el coeficiente de difusión tanto en estado no estacionario D_{ns} como estacionario D_s del hormigón con árido natural a 30 días son muy similares a los encontrados al evaluar D_{ns} y D_s a 1 año. Para el hormigón con árido reciclado los valores de D_{ns} y D_s a 1 año prácticamente igualan a los obtenidos para un hormigón con árido natural, viéndose ligeramente más afectado el coeficiente en estado estacionario D_s por la relación a/c y la cantidad de árido reciclado en el hormigón.

En los diagramas de barras de las Figura 8.28 y Figura 8.29 se presentan los valores medios de D_{ns} y D_s a 7 y 30 días, con la dispersión de datos obtenida en el ensayo. En todos los casos el hormigón con árido reciclado de origen mixto de hormigón ArMh, presenta una mayor penetración de cloruros en el hormigón, debido a su mayor capacidad de absorción y contenido en materiales distintos de hormigón, como cerámicos, yeso, etc. La capacidad de absorción del árido reciclado depende del tipo de árido y su influencia se puede observar directamente en la relación a_{tot}/c , haciéndose crítica para el coeficiente de difusión a cortas edades, ya que a 7 días la diferencia entre los hormigones de árido natural y árido reciclado

de hormigón ArH, es poco perceptible para los dos estados con una baja relación a_{ef}/c (0,4).

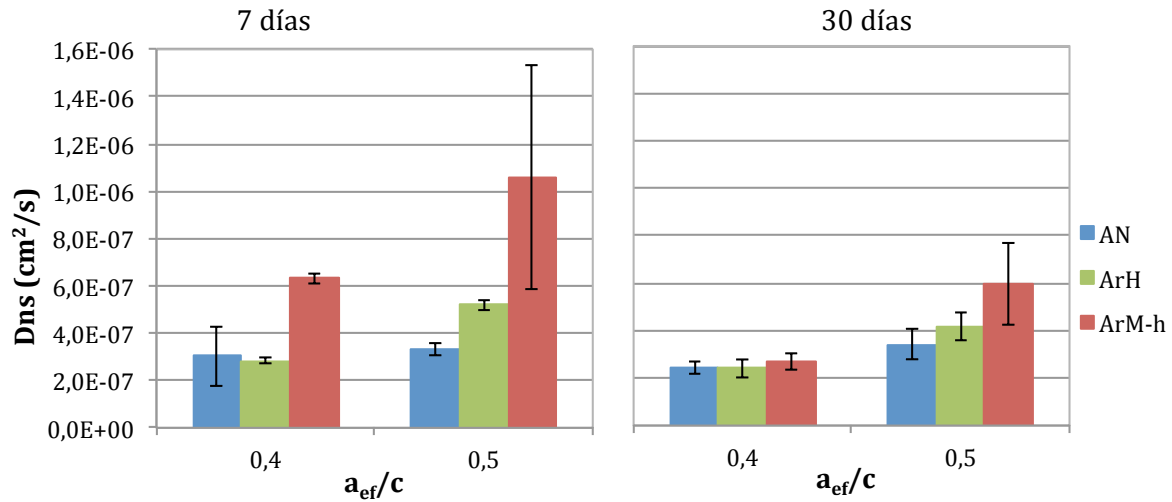


Figura 8.28. Coeficientes de difusión de cloruros en estado no estacionario D_{ns} para los hormigones estudiados a 7 y 30 días.

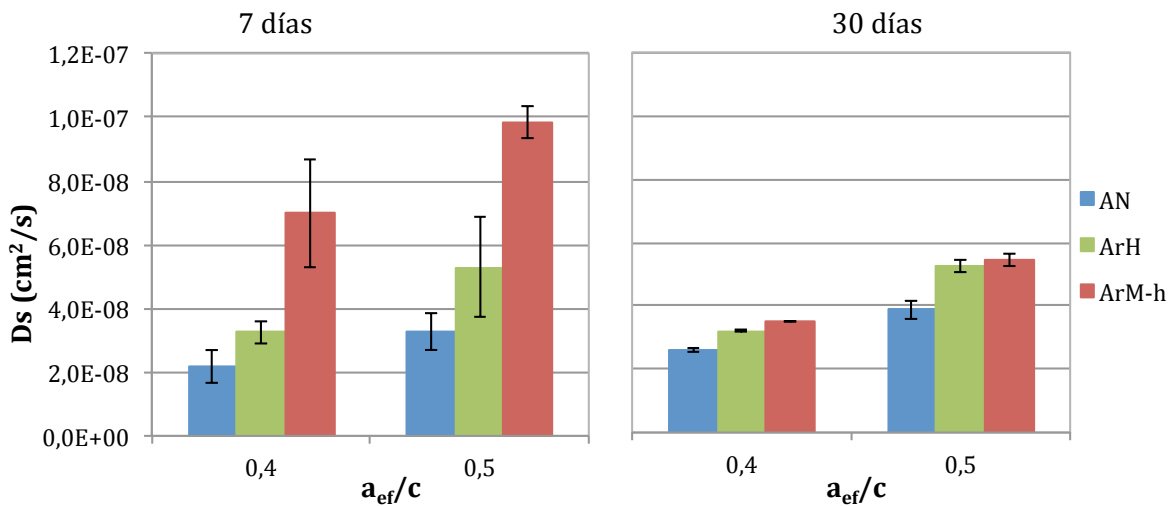


Figura 8.29. Coeficientes de difusión de cloruros en estado estacionario D_s para los hormigones estudiados a 7 y 30 días.

En la Figura 8.30 se presentan en diagramas de barras los coeficientes de difusión D_{ns} y D_s y la dispersión de los resultados para hormigones ensayados con 1 año de edad, donde una vez más se observó que a largo plazo el valor del coeficiente de

difusión de cloruros en hormigones con árido reciclado de hormigón se iguala a los valores para hormigones con árido natural.

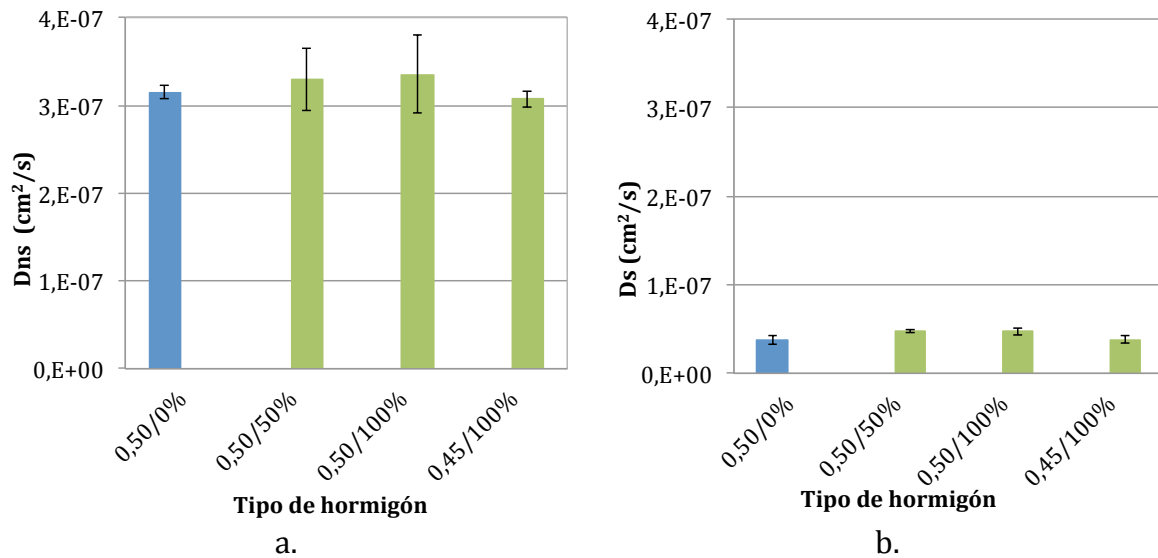


Figura 8.30. Valores de los coeficientes de difusión de cloruros a 1 año para hormigones con árido natural y hormigones con árido reciclado de hormigón. Dns y Ds.

En general el hormigón con árido reciclado presenta un mayor coeficiente de difusión que el hormigón con árido natural. El hormigón con árido natural mantiene un valor de coeficiente de difusión en estado no estacionario similar a lo largo del tiempo, mientras que para un hormigón con una sustitución total de áridos gruesos reciclados (ArH) el coeficiente en estado no estacionario Dns disminuye hasta un 36% a medida que aumenta la edad, llegando a igualar el valor de Dns a 1 año para el hormigón de control, como se observa en la Figura 8.31.a. Para el coeficiente Ds que se refiere al transporte de cloruros en condiciones de flujo constante, en el caso del hormigón con árido reciclado éste disminuye con el tiempo hasta un 11%, mientras que para el hormigón de referencia (AN) tiende a aumentar hasta un 7%. Los resultados indican que el hormigón con árido reciclado puede llegar a retener más cloruros en la fase solida de la pasta de cemento, respecto al hormigón con áridos naturales.

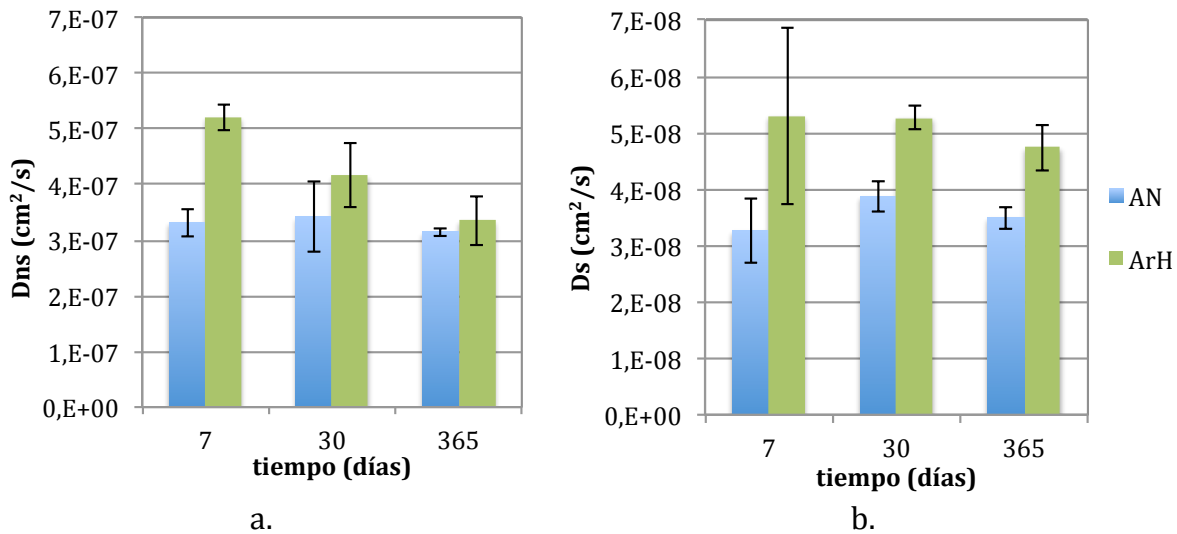


Figura 8.31. Coeficiente de difusión de cloruros para hormigones con árido natural (AN) y 100% de árido reciclado (ArH) con relación a/c 0,50 a distintas edades. a) Coeficiente en estado no estacionario D_{ns} . b) Coeficiente en estado estacionario D_s .

Con los resultados obtenidos, se observó que aunque el árido reciclado influye sobre las propiedades del hormigón frente a la penetración de cloruros, también intervienen factores como la relación a/c y el tipo de cemento, que en determinado caso pueden llegar a ser más determinantes. Por lo tanto se deben utilizar áridos reciclados de calidad ($R_c+R_u > 90\%$ - absorción $< 6\%$) y un cemento adecuado en la fabricación del hormigón, para obtener una matriz de cemento resistente que limite la interconexión de poros y grietas existentes en los áridos reciclados debidas al proceso de producción al que han sido sometidos.

8.2.2 Análisis del contenido de cloruros, por difusión natural

Se evaluó el contenido de cloruros totales en el hormigón bajo el procedimiento de la norma UNE EN 14629-2007 siguiendo el método Volhard. El análisis del contenido de cloruros se realizó a distintas profundidades (de 10 a 60 mm) sobre hormigones con 0% y 100% de árido reciclado con relaciones a_{ef}/c 0,45 y 0,50, sometidos durante un año a un ambiente marino artificial. Un hormigón con a_{ef}/c 0,6 y 100% de árido reciclado de hormigón, también fue ensayado tras 8 meses expuesto al ambiente de cloruros para observar el efecto de una mayor relación agua cemento en hormigones con árido reciclado.

En la Figura 8.32 se presenta el perfil del contenido en cloruros para los hormigones analizados a partir de la valoración del contenido de cloruros según la norma UNE EN 14629-2007 sobre las muestras extraídas para cada profundidad, de conformidad con la misma norma.

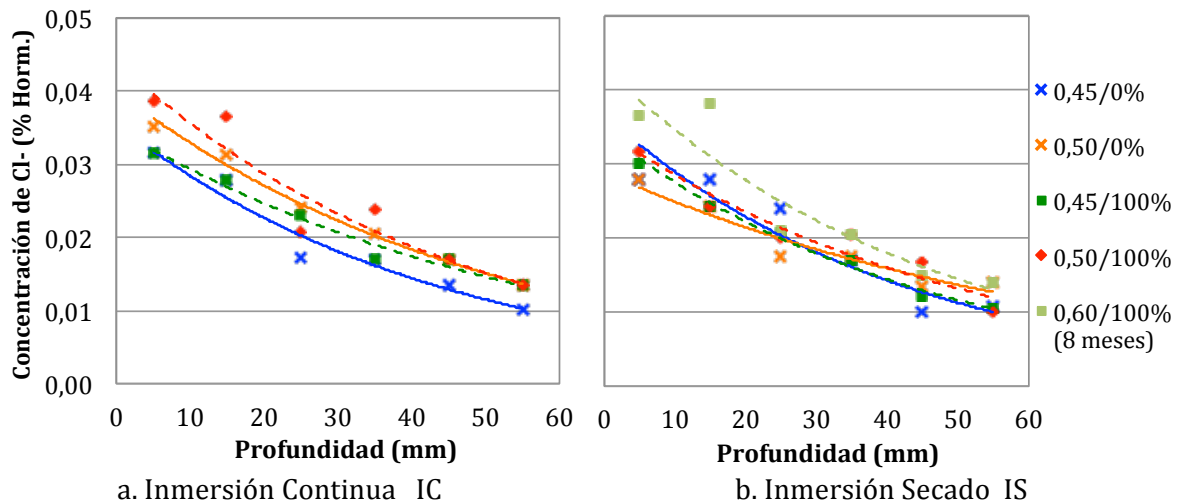


Figura 8.32. Perfil de cloruros para los hormigones analizados a partir de la norma UNE EN 14629:07. a) Condiciones de Inmersión Continua IC. b) Condiciones de Inmersión Secado IS.

Se ha observado que los hormigones en estado de inmersión continua presentaron para este caso, un mayor contenido de cloruros que los hormigones con el proceso de inmersión secado. De acuerdo con Bermúdez (Bermúdez & Alaejos, 2008) la penetración de cloruros en hormigones expuestos a un ambiente marino, es mayor en zonas sumergidas, que en zonas de carrera de mareas, sin embargo el coeficiente de difusión de Cloruros en cada caso, depende directamente de la calidad del hormigón. Además, en los primeros milímetros de recubrimiento el perfil de cloruros suele presentar un comportamiento anómalo, conocido como efecto piel (Ann *et ál.*, 2009).

La relación a_{ef}/c es un factor significativo en el paso de los cloruros a través del hormigón, razón por la que el hormigón con relación a_{ef}/c 0,6 presenta un alto contenido de cloruros a pesar del menor periodo de tiempo que ha estado sometido a las condiciones de ambiente artificial de agua de mar. También se ha observado que el hormigón con ArH y relación a/c 0,5 ha presentado un mayor contenido de cloruros. En general los hormigones con 100% de ArH presentan

mayores contenidos de cloruros, pero este ensayo no permite conocer cuantos de estos cloruros están enlazados a la pasta de cemento y cuantos son realmente peligrosos para la corrosión al encontrarse libres moviéndose a través del hormigón.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en el ensayo de difusión por medio del perfil de concentración de cloruros respecto al ensayo de migración, se procede a determinar el coeficiente de difusión “D” y la concentración superficial “Cs”, en los diferentes perfiles de penetración de cloruros. La valoración del coeficiente de difusión de cloruros a partir del contenido de cloruro fue llevada a cabo en el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, con un modelo desarrollado en la Tesis doctoral (en proceso de terminación) de Michiel Fenaux. Modelling of chloride ion penetration into hardened concrete taking into account the microscopic properties of the material (2012). Para el cálculo se tomó una concentración inicial “C_b” de 0,008775 % respecto al peso de hormigón, calculada mediante valoraciones de contenido de cloruros en los hormigones sin contacto con la solución salina.

Dentro de las condiciones tenidas en cuenta, sobre el valor de la profundidad en el perfil de penetración se tomó el valor medio del espesor de la loncha analizada expresado en (mm), iniciando con el primer punto calculado en la profundidad de 5 mm y terminando en 55 mm, el tiempo de exposición de las probetas en contacto con la solución salina fue de 1 año y el análisis de los valores se realizó bajo la teoría de difusión pura.

En la Figura 8.33 se presentan los coeficiente de difusión obtenidos para los hormigones con árido natural (0%) y árido reciclado de hormigón (100%) respecto a la concentración superficial tras un año de exposición a un ambiente marino en condiciones de inmersión continua (IC) o inmersión secado (IS). La concentración superficial varía con la edad del hormigón.

El uso de un mayor contenido de cemento en el hormigón, genera una mezcla más compacta y una mejor calidad de la interface, lo cual limita la influencia del árido reciclado en el proceso del transporte de agentes agresivos del ambiente a través del hormigón. Debe asegurarse la cantidad de agua en la mezcla para hormigones con árido reciclado garantizando la relación a/c requerida para cumplir con las

propiedades del hormigón. En la Figura 8.34 se presentan los coeficientes arrojados por el modelo según la relación a_{tot}/c y a_{ef}/c . No se aprecian grandes diferencia en función de las variables analizadas por tratarse de hormigones con un año de edad. Como se vio en el apartado anterior el hormigón con árido reciclado y árido natural presenta resultados de coeficiente de difusión a largo plazo en un mismo rango de valores.

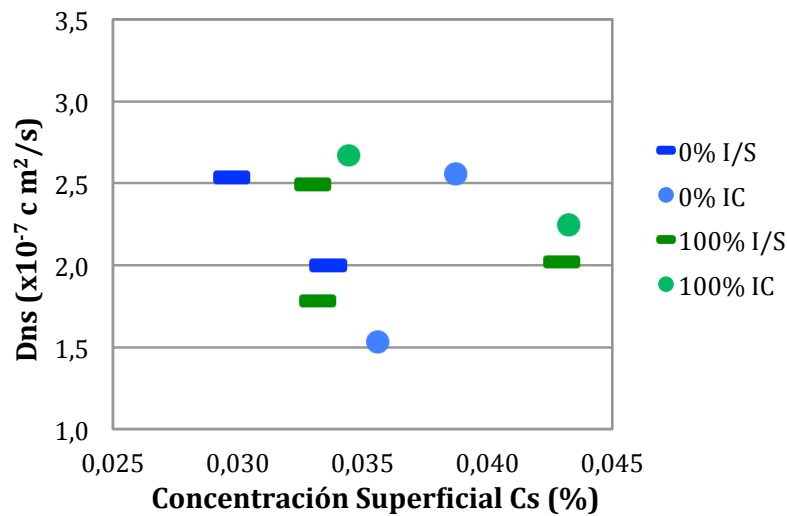


Figura 8.33. Coeficiente de difusión a partir del contenido en cloruros para hormigones con árido reciclado y árido natural tras un año en ambiente marino según la concentración superficial.

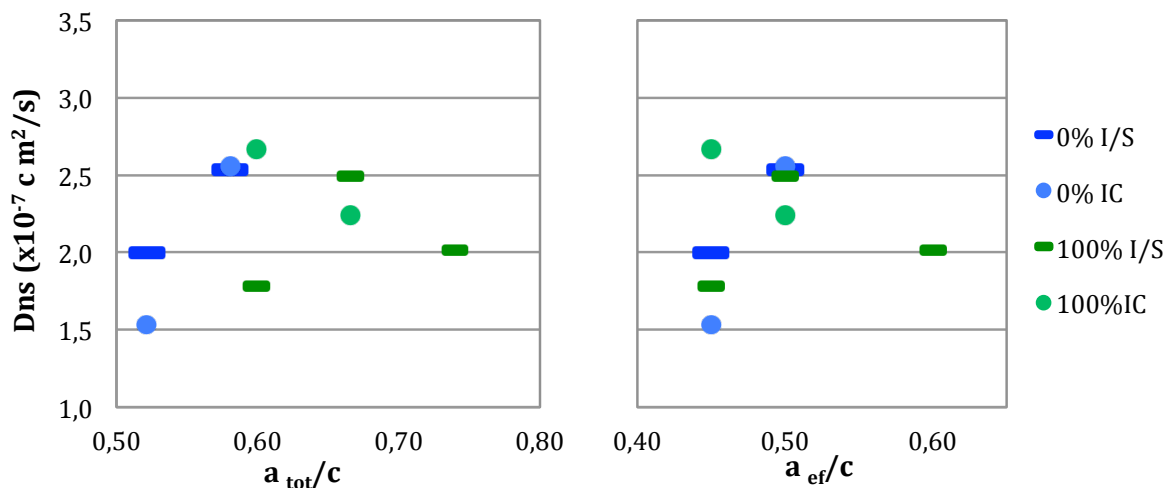


Figura 8.34. Coeficiente de difusión a partir del contenido en cloruros de hormigones con árido reciclado y árido natural tras un año de exposición en ambiente marino según la relación a/c .

En la Figura 8.35 se observan los valores de concentración superficial (C_s) de cloruros en los hormigones estudiados encontrando que para una relación a_{ef}/c de 0,45 se tiene casi el mismo valor sin gran diferencia entre la situación de inmersión (I/S o IC), mientras que para una relación a_{ef}/c de 0,50 las diferencias de la concentración superficial de cloruros respecto al porcentaje de hormigón son más evidentes influenciadas además por la condición de inmersión (I/S o IC).

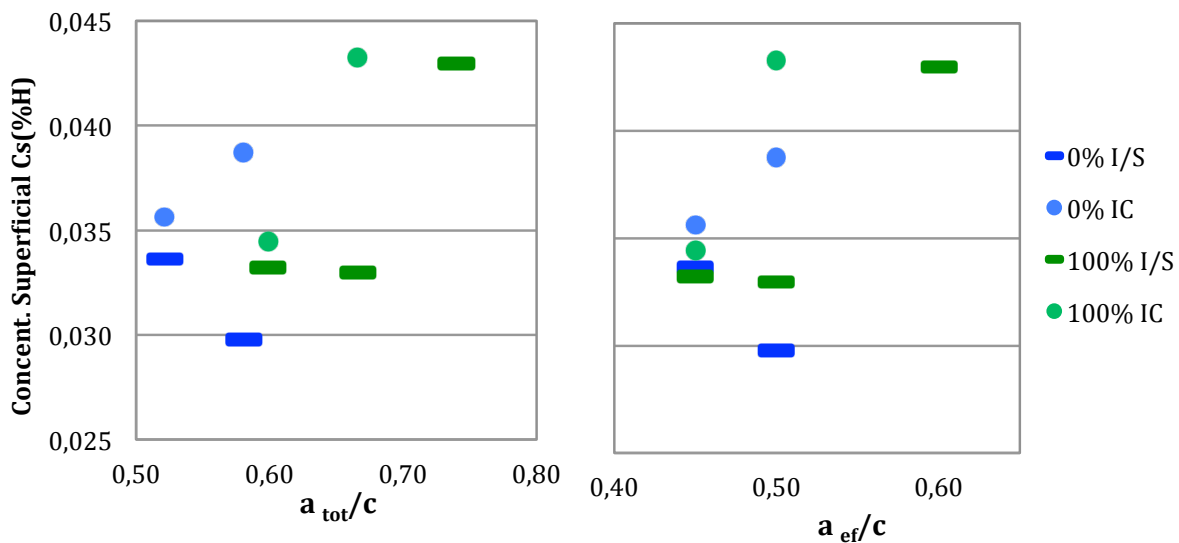


Figura 8.35. Concentración Superficial de cloruros en hormigones con árido reciclado y árido natural tras un año de exposición en agua de mar artificial según la relación a/c .

Se presentan los resultados del coeficiente de difusión de cloruros evaluado por difusión natural y por migración:

- Para hormigones curados 1 año en cámara húmeda, y sometidos a un ensayo de migración (UNE 83987, 2009) y
- Para probetas de hormigón armado expuestas a difusión natural a lo largo de 1 año, sometidas a un análisis del contenido de cloruros (UNE-EN-14629, 2007).

En las siguientes figuras (Figura 8.36, Figura 8.37) se presentan los resultados del coeficiente de difusión de Cloruros en estado no estacionario, para hormigones con árido natural 0% (Tang & Sorensen, 2001; Castellote *et ál.*, 2001; Aponte, 2010) y distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado (Gonçalves *et ál.*, 2004; Berndt, 2009; Evangelista, 2010), según la relación a_{ef}/c y a_{tot}/c encontrados en la

bibliografía, diferenciando los resultados obtenidos en ensayos de difusión y de migración de cloruros. En color verde se representan los resultados obtenidos en esta investigación, señalando con triángulos los resultados del ensayo de difusión y con cuadrados los del ensayo de migración.

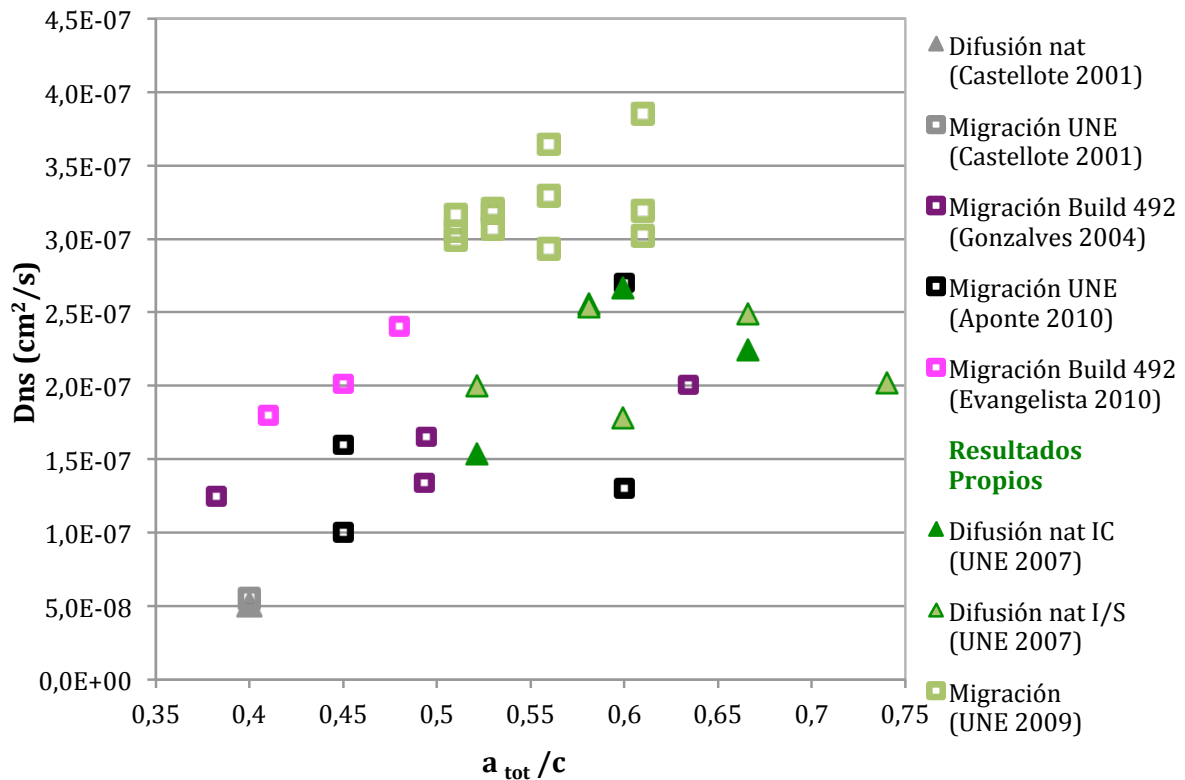


Figura 8.36. Coeficientes de difusión en estado no estacionario D_{ns} respecto a la relación a_{tot}/c , para los hormigones estudiados y datos de la bibliografía correspondientes al ensayo de migración.

Los resultados son presentados a modo informativo, ya que como se ha comentado a lo largo de este apartado es difícil establecer comparaciones objetivas debido a los muchos factores que intervienen, entre ellos el tipo de ensayo, el tipo de cemento y evidentemente en los hormigones reciclados el tipo de árido reciclado.

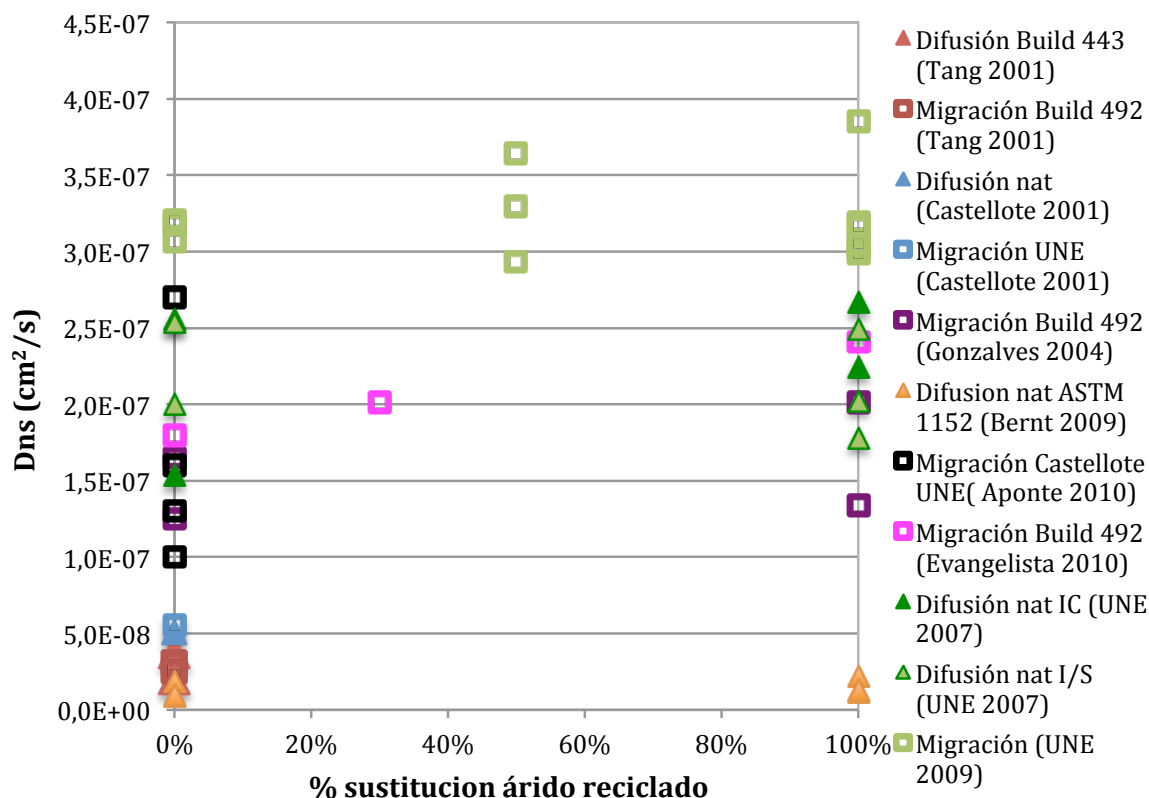


Figura 8.37. Coeficientes de difusión en estado no estacionario D_{ns} para los hormigones estudiados y datos de la bibliografía respecto a la cantidad de áridos reciclados.

En la Figura 8.38 se presentan únicamente los resultados obtenidos en esta investigación, en color azul los resultados de hormigones con árido natural y en color verde los que corresponden a hormigones con árido reciclado de hormigón (ArH). Los marcadores con forma de círculo y raya señalan los resultados de D_{ns} obtenidos en el ensayo de migración de cloruros (UNE 83987, 2009) en probetas con 1 año en cámara húmeda, mientras que los marcadores en forma de cuadrado y triangulo representan los resultados en hormigones sometidos al ensayo de difusión (UNE-EN-14629, 2007), en ambiente de inmersión continua e inmersión secado respectivamente, sobre probetas expuestas 1 año a un ambiente marino.

En general se obtienen mayores valores de D_{ns} para los hormigones sometidos al ensayo de migración con un campo eléctrico de 12V, lo que significa que el ensayo de migración es conservador y por lo tanto adecuado para la estimación de la vida útil de las estructuras.

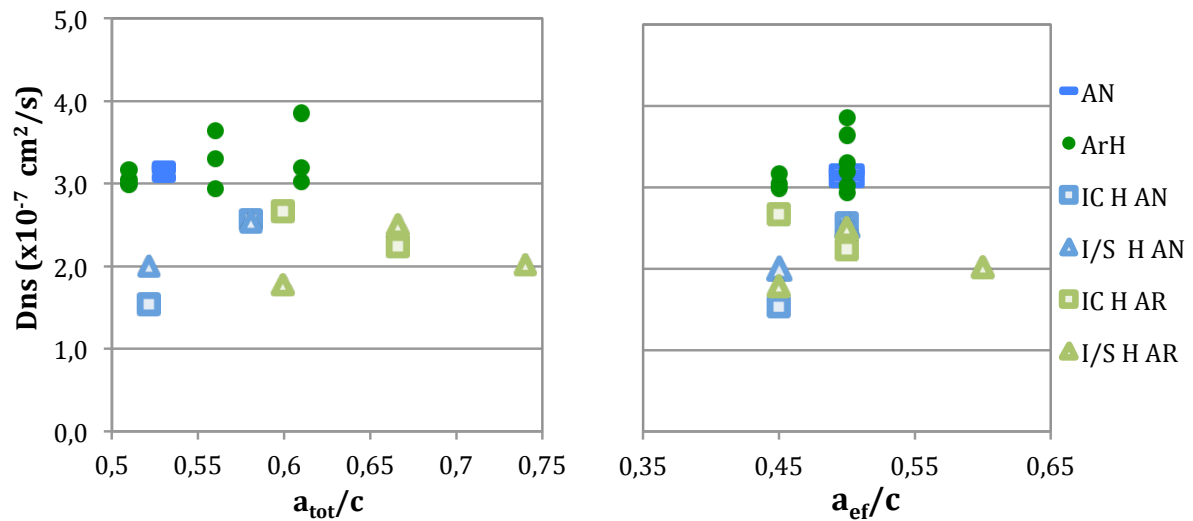


Figura 8.38. Valores del coeficiente de difusión de cloruros sobre hormigones con 1 año, analizados bajo ensayos de migración y de difusión natural.

La metodología de este ensayo de migración de cloruros ha permitido obtener resultados coherentes y validos para ser comparados con los resultados obtenidos por difusión natural.

El rango en el que oscilan los valores para hormigones con 1 año de edad con árido natural y reciclado de hormigón, tienden a presentar valores similares para el coeficiente de difusión de cloruros en estado no estacionario.

Se concluye que el uso de áridos reciclados que cumplen con los requisitos físicos, químicos y mecánicos para uso en hormigón permiten obtener un hormigón resistente a la penetración de cloruros por lo menos en la misma proporción que un árido natural y que la relación a_{tot}/c de 0,50 que establece la EHE como limite para ambiente marino es conservadora, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en este trabajo se refieren a una relación a/c respecto al agua efectiva a_{ef}/c 0,50. El árido reciclado utilizado es adecuado para su aplicación en hormigón estructural.

El uso de áridos reciclados (ArH) para hormigón, es válido para hormigones expuestos a un ambiente marino, sin embargo debe utilizarse el tipo de cemento y la relación agua/cemento adecuados para cada aplicación, además de garantizar que el correcto proceso de dosificación, fabricación y curado.

8.3 Evaluación de la corrosión de armaduras

Se ha utilizado el corrosímetro GECOR 6, para determinar la intensidad de corrosión instantánea de las armaduras embebidas en el hormigón mediante la técnica de la resistencia de polarización o polarización lineal, aplicada en el confinamiento de la señal. El GECOR6 calcula la intensidad de corrosión a partir de la resistencia de polarización.

Las relaciones a/c estudiadas o largo de esta tesis han sido definidas con la intención de cumplir los requisitos para un ambiente agresivo de agua de mar, pero con el valor de la relación a_{ef}/c , como la mayoría de las recomendaciones en el mundo. Cabe mencionar que la instrucción de hormigón estructural EHE-08, toma como referencia el agua total, aunque no es totalmente clara al especificar el tipo de agua que contempla en la relación a/c máxima exigida y para el caso de los hormigones con árido reciclado es muy importante definir si se trata de a_{tot}/c o a_{ef}/c debido a las características del árido reciclado, específicamente su mayor absorción. En términos de agua total (a_{tot}/c), el hormigón supera los valores recomendados en la instrucción española EHE-08 para ambiente marino, pero las cantidades mínimas de cemento son respetadas (330 y 380 Kg/m³), al igual que la resistencia característica mínima a compresión (35 y 40 MPa). Lo que evidencia la importancia de aclarar el termino a_{tot}/c y a_{ef}/c para hormigones con árido reciclado.

8.3.1 Hormigón en situación de inmersión secado.

En la Figura 8.39 se representa el potencial de corrosión (E_{corr}) obtenido para los hormigones con distintos contenidos de árido reciclado, señalando los límites establecidos por la (ASTM C 876, 2009) para evaluar la probabilidad de corrosión. Es importante recordar que la medida del potencial es solo un indicador de la actividad de corrosión y no predice la corrosión, los E_{corr} proporcionan orientaciones exclusivamente cualitativas.

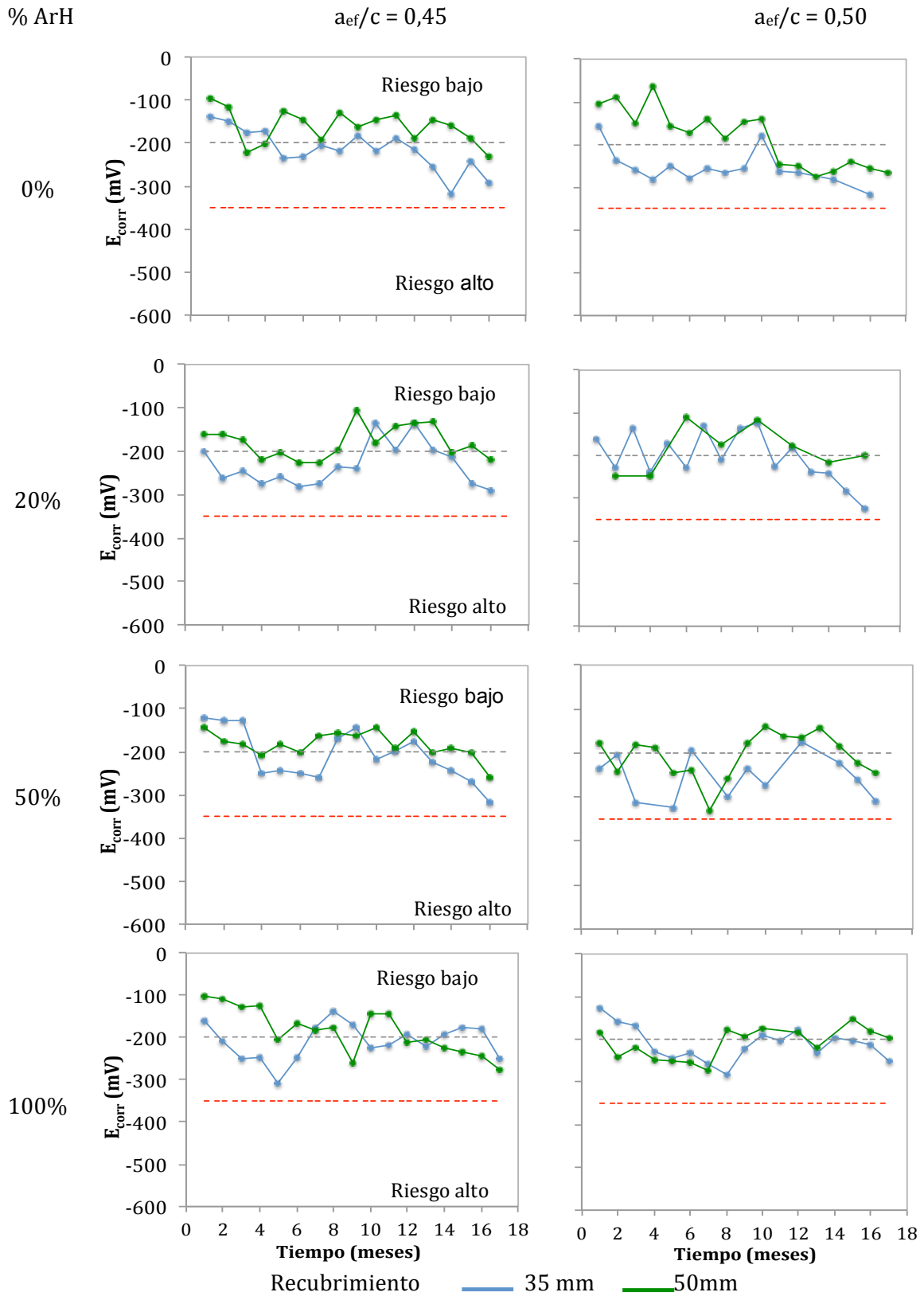


Figura 8.39. Potencial de corrosión (E_{corr}) a 35 y 50 mm para los hormigones con 0%, 20%, 50% y 100% de árido reciclado, sometido a ciclos de Inmersión Secado (I/S).

En la Figura 8.40 se observan gráficamente los resultados de intensidad de corrosión (I_{corr}) para los hormigones con distintos porcentajes de sustitución, donde además se señalan como límites 0,1 y 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (BRE, 2000), para determinar el nivel o la situación de corrosión en el hormigón. Las I_{corr} ofrecen una información cuantitativa sobre el proceso de deterioro del acero de refuerzo.

En las figuras se presentan los resultados de potencial de corrosión medio e intensidad de corrosión media (E_{corr} e I_{corr}) para cada mes, resultado del promedio de 8 lecturas para cada valor de recubrimiento o distancia hasta la armadura de 35 y 50 mm. Las lecturas de corrosión fueron tomadas siempre después del periodo de inmersión, con una humedad del 100% en el hormigón que permitía obtener valores estables.

Se observó que frente a la corrosión un hormigón con árido reciclado presenta un comportamiento muy similar a un hormigón con árido natural, por lo tanto es factible el uso de áridos reciclados para ambientes marinos, con precauciones sobre la cantidad de agua en la mezcla y la calidad de los áridos.

Según los potenciales de corrosión obtenidos para hormigones en condiciones de inmersión secado (I/S) se observó que los hormigones no presentan una alta probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C-876, y no se encuentran diferencias significativas entre hormigones con a/c 0.45 y 0.50, ni entre los hormigones con árido reciclado respecto a los de árido natural, aunque sí para la profundidad del recubrimiento. En general se ha presentado un mayor valor en el potencial de corrosión para el recubrimiento de 35 mm respecto al de 50mm, aunque en algunas probetas, esta afirmación no fue tan clara.

En el caso de las probetas sometidas a ciclos de inmersión secado (I/S), a lo largo de un año las lecturas del potencial de corrosión (E_{corr}) se localizan en la zona de menor probabilidad de corrosión e incertidumbre, con valores de hasta -350mV, aunque presentan una tendencia hacia valores más negativos, sin embargo los valores obtenidos para I_{corr} son bajos, encontrándose siempre en el rango de bajo nivel de corrosión. Incluso algunos valores obtenidos pueden permitir afirmar que el ingreso de agentes agresivos al hormigón con áridos reciclados, puede verse compensado por la habilidad del árido reciclado para combinarse con los cloruros o el CO_2 , reduciendo su penetración.

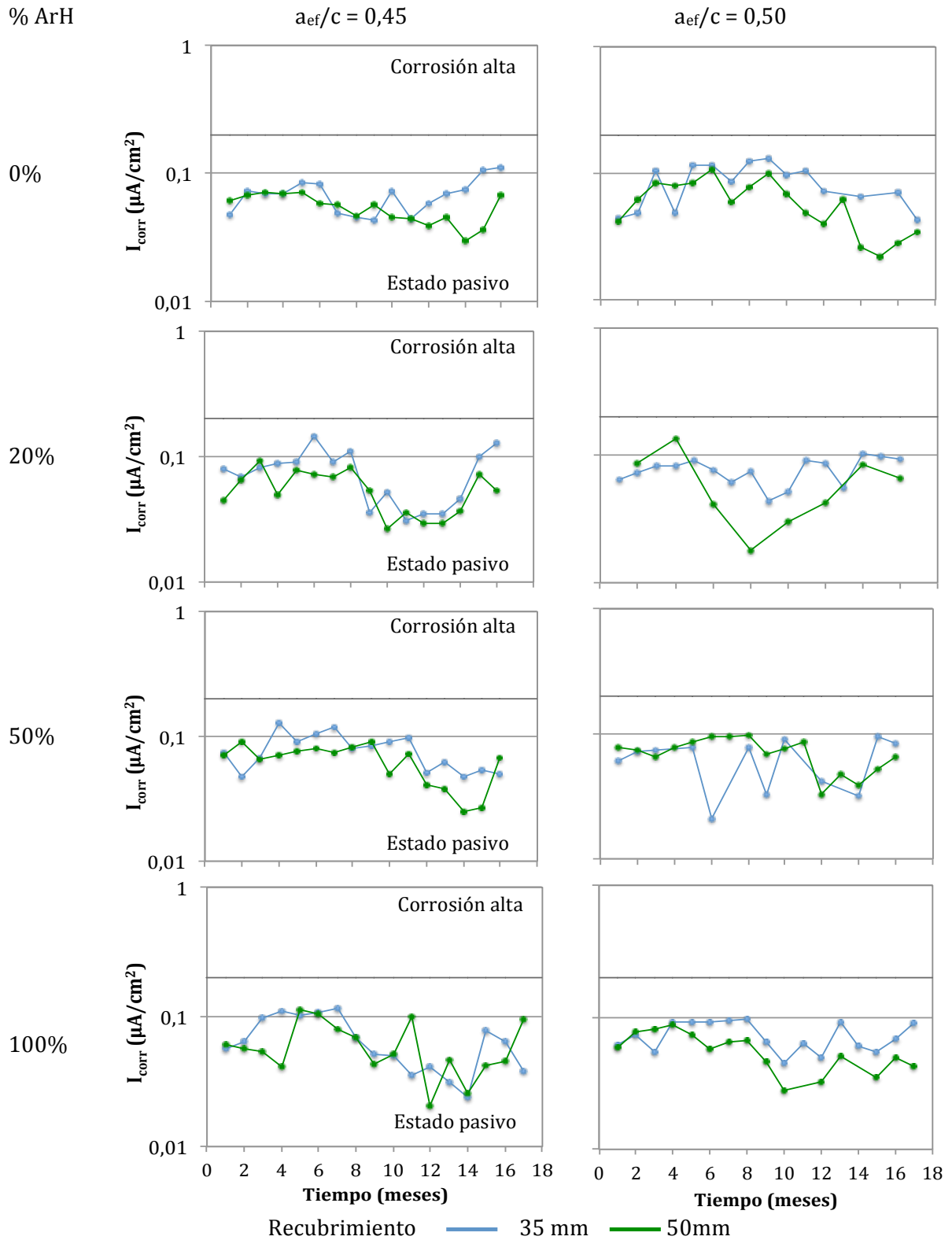


Figura 8.40. Intensidad de corrosión (I_{corr}) para hormigones con 0%, 20%, 50% y 100% de árido reciclado, con 35 y 50 mm de recubrimiento, sometido a ciclos de Inmersión Secado (I/S).

En los hormigones evaluados frente a ciclos de Inmersión Secado (I/S) no se han obtenido intensidades de corrosión superiores a $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lo cual indica que no se presenta corrosión activa (Andrade, Alonso, & González, 1990) en los hormigones analizados.

Se han obtenido resultados que superan el límite (-350mV) que situaría los hormigones en alta probabilidad de corrosión ($>90\%$), sin que necesariamente sean las probetas que contienen árido reciclado. Altos valores de E_{corr} fueron encontrados para probetas con algunos defectos de fabricación, y han sido descartados de las gráficas que se presentan, ya que evidentemente son un punto débil para cualquier de hormigón, y esta tesis no pretendía evaluar la corrosión por errores de fabricación.

8.3.2 Hormigón en situación de inmersión Continua

En la Figura 8.41 y Figura 8.42 se presentan los resultados de potencial de corrosión E_{corr} e intensidad de corrosión I_{corr} para los hormigones en situación de Inmersión Continua (IC). Aunque los hormigones armados ensayados han superado el límite de potencial de corrosión (-350mV) y en general los resultados son mayores para las probetas sumergidas continuamente, donde no hay ingreso de oxígeno, los valores de I_{corr} se mantienen por debajo del límite establecido $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, aunque con gran dispersión.

En algunos casos se observó que la actividad corrosiva fue mayor en los primeros meses, debido a fenómenos de inestabilidad por el enlace de iones cloruro con la matriz de cemento (RILEM/CEB/FIP, 1983). Se ha observado que para hormigones en estado sumergido el uso de la árido reciclado grueso de hormigón no representa un efecto negativo que haga pasar el nivel de corrosión de un estado pasivo a uno activo.

El tipo de árido reciclado utilizado cumple los requisitos de calidad necesarios para esta aplicación, sin embargo con áridos contaminados el riesgo es alto, Debieb (Debieb *et ál.*, 2010) encuentra que un hormigón armado con 100% de áridos reciclados finos y gruesos contaminados por cloruros, sulfatos o agua de mar,

presenta un alto potencial de corrosión (más del 90%) respecto a los límites establecidos por la (ASTM-C876, 2009).

Teniendo en cuenta la importancia de la barrera de protección física del hormigón, se establece que con los valores de recubrimiento evaluados, no se encuentra un alto riesgo de corrosión para los hormigones estudiados. Por otro lado, y haciendo referencia a la barrera química, el cemento empleado resistente al ambiente marino también juega un papel importante en los resultados obtenidos, ya que se comprobó que efectivamente en los hormigones con árido reciclado la matriz de la pasta de cemento y por lo tanto la relación a/c y el tipo de cemento, son factores determinantes en sus propiedades de durabilidad.

Dentro de los ensayos utilizados, para la evaluación de la durabilidad, el uso de la técnica de la resistencia de polarización o polarización lineal para determinar el potencial de corrosión y la intensidad de corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón, no ha permitido establecer parámetros restrictivos sobre el comportamiento de hormigones con árido reciclado respecto a hormigones con árido natural para este caso de estudio, ya que en ocasiones los valores son dispersos y no presentan siempre la misma tendencia aun en el rango de medida. Las variables de ensayo fueron concebidas dentro de los requisitos de la instrucción española EHE y bajo estas condiciones se han obtenido hormigones con características de durabilidad buenas.

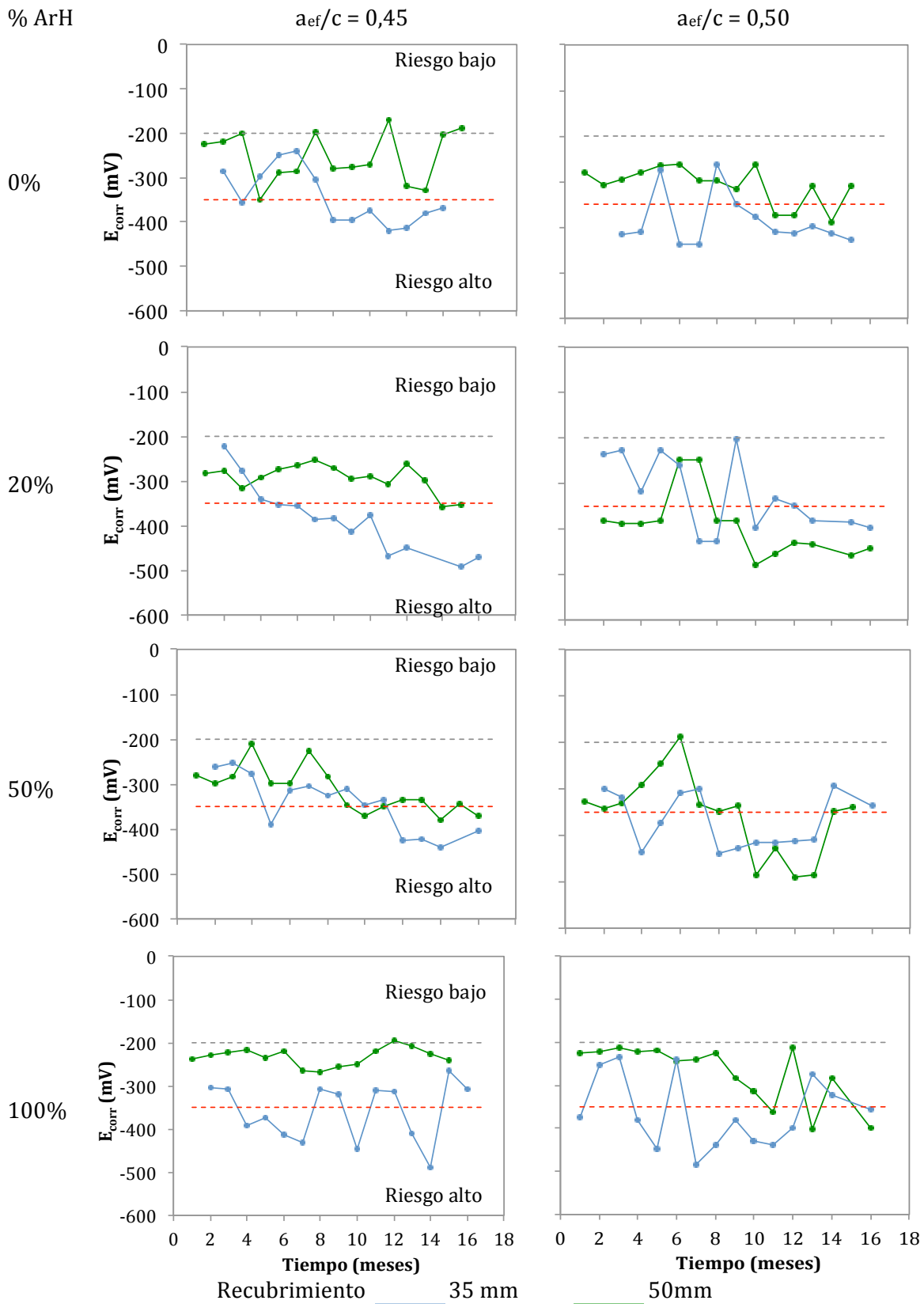


Figura 8.41. Potencial de corrosión E_{corr} a 35 y 50 mm para los hormigones con 0%, 20%, 50% y 100% de árido reciclado, sometido a Inmersión Continua (IC).

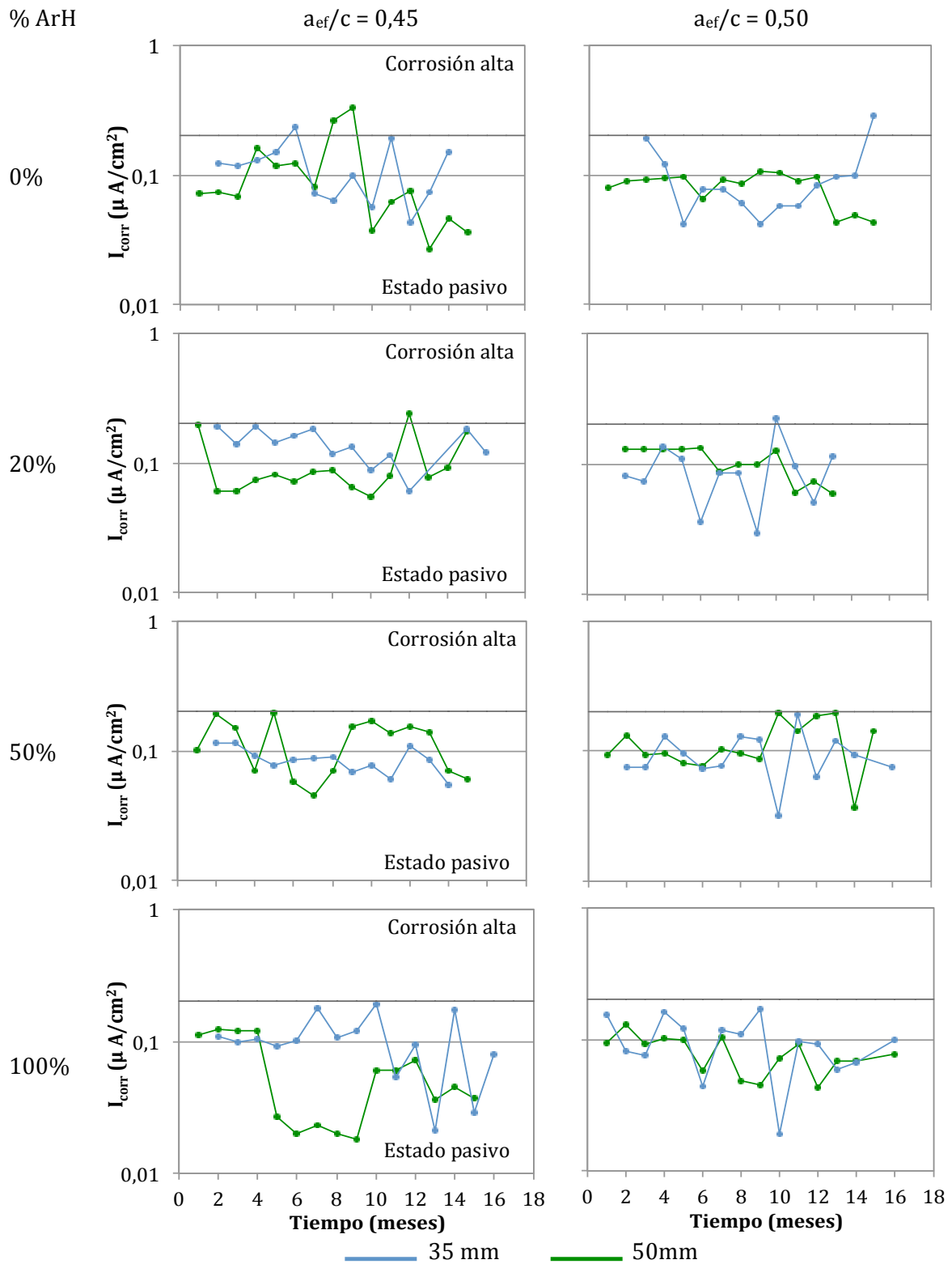


Figura 8.42. Intensidad de corrosión (I_{corr}) para hormigones con 0%, 20%, 50% y 100% de árido reciclado, con 35 y 50 mm de recubrimiento, sometido a ciclos de Inmersión Continua (IC).

Algunas de las probetas expuestas al ambiente marino, se llevaron a rotura para observar el interior del hormigón y las armaduras. Como se puede observar en la Figura 8.43, en general no se han encontrado indicios de corrosión en el interior del hormigón armado, solo en los lugares expuestos al exterior por el proceso de fabricación de las probetas.



Figura 8.43. Probetas de hormigón armado sometidas a rotura para observar las armaduras embebidas.

El uso de hasta un 100% de áridos gruesos reciclados de hormigón (ArH) para la fabricación de hormigones armados no incrementa el riesgo del hormigón frente a la corrosión de armaduras por penetración de cloruros en un ambiente marino. A pesar de haber empleado una mayor relación a_{tot}/c 0,67 que la recomendada en la instrucción EHE 0,50, ha sido posible obtener un hormigón con las características adecuadas frente a solicitudes mecánicas y de durabilidad. Las recomendaciones de la EHE frente a la relación a/c son muy conservadoras al referirse a la relación a_{tot}/c .

Para la evaluación experimental de la corrosión en el hormigón por la acción de los cloruros, no es suficiente el uso del GERCOR como único elemento para evaluar esta propiedad, debido a que los resultados se ven afectados por diversas

variables, presentando altos potenciales de corrosión incluso sin presencia de oxígeno, en las probetas en situación de inmersión continua. Sobre las probetas en condiciones de inmersión secado no se encontró un alto potencial de corrosión, sin embargo, serán mantenidas en las condiciones de ensayo en el laboratorio para evaluaciones en un periodo de tiempo mas prolongado, pero encontrar tendencias similares en las lecturas de los hormigones con árido reciclado respecto a los hormigones con árido natural al inicio de su vida útil es muy alentador teniendo en cuenta que como se comprobó con los ensayos de migración las propiedades del hormigón reciclado mejoran con la edad.

Para los hormigones con recubrimientos de 35mm y 50mm y hasta un 100% de sustitución de árido reciclado grueso de hormigón, con relación a_{ef}/c de hasta 0,50 estudiados a lo largo de 15 meses las velocidades de corrosión encontradas no manifiestan una situación de corrosión, lo cual fue comprobado en el momento de inspeccionar las armaduras, donde no se observaron signos de corrosión.

Aunque el uso del GERCOR es útil para la evaluación de la evolución del potencial y la intensidad de corrosión como una herramienta de ensayo no destructiva, los ensayos de migración han permitido entender el fenómeno de la difusión de cloruros en el hormigón reciclado, lo cual ha sido importante a nivel experimental, encontrando que el hormigón con árido reciclado con el tiempo llega a condiciones iguales o mejores a un hormigón con árido natural, impidiendo el paso de agentes agresivos al interior del hormigón.

Capítulo 9

Conclusiones y Futuras líneas de investigación

9.1 Conclusiones

A lo largo de este estudio se ha evaluado el comportamiento de hormigones con árido reciclado frente a propiedades mecánicas y de durabilidad, con un análisis hacia la corrosión de armaduras por penetración de cloruros en un ambiente marino, lo cual ha permitido obtener las siguientes conclusiones como aporte al conocimiento científico para la elaboración de recomendaciones que garanticen un comportamiento adecuado de este material frente a las solicitaciones requeridas, por lo tanto:

Un hormigón con áridos reciclados gruesos procedentes de hormigón es viable en hormigón estructural frente a solicitaciones mecánicas y de durabilidad, contribuyendo a la optimización del uso de recursos naturales y la gestión de residuos hacia un ciclo cerrado de la construcción.

En el mercado español se pueden encontrar áridos reciclados de hormigón con la calidad requerida para su uso a nivel estructural en hormigones de hasta 40 MPa.

La relación agua/cemento es un factor determinante sobre las propiedades mecánicas del hormigón reciclado y se debe establecer claramente con que criterios se trabaja y en cualquier caso tener en cuenta toda el agua que puede estar presente en el hormigón. Es necesario un control sobre la humedad de los áridos para el proceso de dosificación, de manera que se tenga claramente establecida la cantidad de agua que se espera reaccione con el cemento, es decir conocer el a/c efectiva y a/c total.

El efecto que tiene la sustitución total o parcial del árido grueso natural por árido grueso reciclado depende del tipo y procedencia del árido reciclado, es decir, sus propiedades y composición. Por lo tanto para aplicaciones estructurales el contenido en partículas de hormigón y áridos limpios (R_c+R_u) es determinante, ya que éste afecta directamente las demás propiedades del árido reciclado. Un árido reciclado con un alto contenido de hormigón (R_c) presenta una mayor capacidad de absorción y una menor la densidad de los áridos reciclados. Por lo que R_c es un parámetro importante a tener en cuenta al elegir un tipo de árido reciclado.

9.1.1 Respecto a las propiedades Mecánicas

Respecto al comportamiento mecánico, las propiedades del hormigón se han visto afectadas a medida que incrementa la cantidad de árido reciclado en la mezcla, debido a la mayor relación a_{tot}/c . Si el árido tiene características físicas y de composición similares es posible fabricar hormigón reciclado utilizando árido procedente de distintas fuentes y obtener una resistencia a compresión con coeficientes de variación admisibles.

La microestructura del hormigón con áridos reciclados es mucho más complicada que la del hormigón convencional, debido a que cuenta con dos tipos de interfase. Por lo tanto se recomienda el uso de una baja relación a/c para generar una mezcla mas compacta, limitando y disminuyendo la influencia del árido reciclado en el proceso de transporte de agentes agresivos del ambiente en el hormigón.

Con el propósito de obtener una adecuada zona de interfase, algunos autores defienden procesos para mejorar las propiedades del árido reciclado, mediante tratamientos de pre-saturación en distintas soluciones, pero el proceso de pre-tratamiento conducirá a elevar el costo de producción y por lo tanto a limitar su aplicación en la construcción. Sin embargo, el proceso de mezcla realizado en este trabajo fue suficiente para obtener una interfase adecuada para el hormigón reciclado sin realizar tratamientos previos que puedan llegar a estigmatizar el uso del árido reciclado en la industria.

Un adecuado proceso de fabricación, garantiza una interfase, la cual influye directamente sobre las propiedades del hormigón reciclado, y especialmente sobre la difusión de cloruros, donde las interfases del hormigón reciclado juegan un papel importante.

La resistencia a compresión disminuye entre un 8 y 12% para un hormigón con 100% de árido reciclado respecto al hormigón con árido natural a 28 días, sin embargo la resistencia a compresión en hormigones reciclados incrementa con la edad de curado a una tasa mayor que para hormigones con árido natural, llegando a iguales niveles después de 1 año.

La resistencia a tracción indirecta y el módulo de elasticidad disminuye para los hormigones con mayor contenido de áridos reciclados hasta un 15% y un 25% respectivamente, para el caso de la mayor relación a/c total obtenida 0,67.

Áridos reciclados de hormigón, que presentan una calidad adecuada en valores de absorción, pueden ser utilizados para la fabricación de hormigón, sin generar pérdidas sobre las propiedades mecánicas del hormigón, cuando se utilicen relaciones a/c bajas ($a_{ef}/c < 0,5$ y/o $a_{tot}/c < 0,6$).

9.1.2 Respecto a las propiedades Durabilidad

En general, la durabilidad del hormigón, se reduce con el aumento de las cantidades de árido reciclado en una mezcla y mejora con la edad de curado.

En estructuras expuestas a un ambiente marino inicialmente las sales entran según la capacidad de absorción del hormigón, que es mayor a medida que aumenta el

contenido de áridos reciclados en la mezcla, pero la velocidad de difusión y la profundidad de penetración dependen de parámetros como la relación a/c, el tipo de cemento, la temperatura, el contenido de humedad interior, el tipo de difusor, la capacidad de enlace de los cloruros, el espesor de recubrimiento y la fisuración del hormigón entre otras, por lo que el uso de áridos reciclados en el hormigón estructural es viable si se cumplen estos parámetros.

El uso de materiales adecuados permite obtener un hormigón durable, el tipo de árido reciclado tiene gran influencia sobre las propiedades del hormigón al igual que la cantidad y el tipo de cemento tienen un papel importante. Con el cemento resistente al agua de mar se han obtenido resultados aceptables para los hormigones reciclados, por lo que efectivamente en los hormigones con árido reciclado la matriz de la pasta de cemento es determinante y por lo tanto la relación a/c y el tipo de cemento, son factores determinantes en sus propiedades de durabilidad.

Para satisfacer las condiciones de durabilidad se debe definir, proyectar y ejecutar correctamente el hormigón, por lo tanto el ajuste de las dosificaciones siempre debe ser de acuerdo a la granulometría de los áridos utilizados, ya que una sustitución simple del porcentaje de árido grueso natural por árido grueso reciclado puede influir negativamente en las propiedades del hormigón.

Respecto a las propiedades de durabilidad de los hormigones reciclados, al analizar los mecanismos de transporte bajo la normativa actualmente vigente, se encontró que los ensayos más determinantes para conocer las características de los hormigones reciclados corresponden al análisis de succión capilar y difusión en el hormigón.

La incorporación del árido reciclado en el hormigón representa un aumento de su porosidad, su capacidad de absorción y su permeabilidad, aunque el resultado final depende de las características de la nueva matriz cementante.

El ensayo de penetración de agua bajo presión no arroja datos concluyentes para la clasificación del hormigón con árido reciclado a pesar de que evidentemente su porosidad aumenta con el contenido de árido reciclado en la mezcla. Solo para una sustitución del 100% se encuentran diferencias claras respecto al control, que disminuyen con la edad de curado.

La evaluación de la resistencia a la penetración de cloruros es la característica más importante a evaluar para prevenir el deterioro prematuro de estructuras de hormigón. En un ensayo acelerado de difusión de cloruros se obtienen periodos de transición más largos y una menor concentración de cloruros cuando la relación a_{tot}/c es menor. Para el hormigón con árido reciclado el coeficiente de difusión de cloruros disminuye con el tiempo, en un porcentaje mayor que el hormigón con árido natural.

En la evaluación de la penetración de cloruros, a distintas edades, se observó que factores como la relación a/c del hormigón, el tipo de árido utilizado y evidentemente la edad del hormigón, son determinantes. La resistencia a la penetración de cloruros en el hormigón con árido reciclado aumenta con la edad, a una tasa mayor que para el hormigón con árido natural debido al sellado de los poros por los fenómenos que se generan en la pasta. Así el coeficiente de difusión de cloruros puede ser una herramienta válida para estimar la vida útil de servicio de las estructuras, pero es importante considerar el hecho de que el coeficiente de difusión de cloruros disminuye con la edad para el caso de los hormigones con árido reciclado.

Los valores de recubrimiento recomendados por la EHE para hormigón en ambiente marino evaluados en esta tesis, son eficientes como barrera de protección física de las armaduras embebidas en el hormigón con árido natural o reciclado.

El hormigón con árido reciclado de origen mixto de hormigón ArMh, puede llegar a cumplir las exigencias de comportamiento mecánico, sin embargo, frente a la evaluación de la durabilidad presenta una menor resistencia a penetración de cloruros, potenciada a medida que una mayor relación a/c es utilizada. Por ellos su uso en hormigón estructural no es recomendado y se hacen necesarias más investigaciones. Incorporar áridos reciclados mixtos implica necesariamente el diseño de un hormigón con mayor contenido de cemento y un mayor control sobre las impurezas propias del árido. La conductividad observada en las muestras de hormigón con árido reciclado mixto de hormigón (ArMh) fue cerca del doble a la presentada por los hormigones con árido reciclado de hormigón (ArH).

La corrosión de un hormigón con sustitución total de árido reciclado grueso de hormigón y relación a_{tot}/c menor a 0,60 presenta un comportamiento muy similar a un hormigón con árido natural, por lo tanto es factible el uso de áridos reciclados en hormigones sometidos a un ambiente marino.

El potencial de corrosión del acero E_{corr} en hormigones con árido reciclado tiende a ser mas negativo con el tiempo aunque inicialmente las medidas no son estables a un año es posible observar una tendencia que localiza a los hormigones en la zona de probabilidad de riesgo, aunque se observó un comportamiento similar para el hormigón con árido natural en las condiciones estudiadas. La intensidad de corrosión I_{corr} se encuentra en valores bajos, sin alcanzar un estado de corrosión activo. Por lo tanto, se afirma que los valores de recubrimiento propuestos en la EHE-08 para el ambiente marino, son adecuados para este tipo de hormigones, además la selección del tipo de cemento adecuado también proporciona seguridad a la estructura de hormigón armado frente a la corrosión inducida por cloruros.

9.2 Futuras líneas de investigación

El hormigón armado con áridos reciclados representa un reto para la industria de la construcción como un material útil para una construcción sostenible y aunque el desarrollo de esta tesis doctoral es un paso más en ese sentido, quedan aún temas sobre los que no se ha profundizado o que no han sido parte de los objetivos propuestos pero que durante el desarrollo de este trabajo han salido a la luz. Aunque se han evaluado distintas propiedades y escenarios, no hemos llegado al final del camino, por lo que a continuación se presentan algunas de las acciones a emprender o sobre las que continuar en el futuro:

Una continuidad en el estudio de la corrosión durante un periodo de tiempo más prolongado con procesos más acelerados permitirá conocer la evolución del potencial y la intensidad de corrosión sobre los hormigones con árido reciclado respecto a hormigones con árido natural.

El análisis de la corrosión se centro en el ataque por cloruros, pero pueden presentarse además otros procesos de deterioro que pueden vulnerar la durabilidad del hormigón debido a la corrosión de armaduras.

Comprobar si los modelos para determinar el coeficiente de difusión D y la predicción de la vida útil son adecuados para hormigones con árido reciclado, y tienen en cuenta la mejora de sus propiedades con el tiempo.

El hormigón con árido reciclado presenta una mayor conductividad en el ensayo de migración de cloruros, será interesante determinar exactamente el tipo de iones que pasan a través del hormigón, del cátodo hacia el ánodo en el ensayo de migración, ya que debido a los distintos componentes del árido reciclado el ensayo puede reflejar un mayor paso de iones no necesariamente de cloruros al que realmente esta ocurriendo.

Analizar a nivel microscópico las reacciones químicas que se producen en el hormigón sometido a un ambiente marino, determinar en el perfil la formación la

sal de Friedel. Ensayos que discriminen cantidad de cloruros libres y enlazados son necesarios para la evaluación de la penetración de cloruros en el hormigón.

Determinar la capacidad de enlace de cloruros en el hormigón según el contenido de áridos reciclados, evaluar perfiles de penetración en el ensayo de migración, para analizar la formación de sal de Friedel.

Evaluación de hormigones con mayores relaciones a/c y menores valores de recubrimiento, para evaluar la sensibilidad del GERCOR a hormigones donde los árido reciclados tengan una mayor influencia, para validar esta técnica no destructiva y rápida en la estimación de la corrosión en hormigones de este tipo.

Análisis de penetración de Cloruros por el método Potenciométrico y comparar los resultados obtenidos con el método Volhard.

Establecer un modelo para el análisis de la vida útil en hormigones con árido reciclado donde sus propiedades de durabilidad mejoran con el tiempo a un porcentaje mayor que para un hormigón convención, de manera que se estimen sus capacidades reales, pues aunque a corto plazo se ven disminuidas, a mediano y largo plazo mejoran sustancialmente.

Ajustar el método de análisis para la permeabilidad de agua bajo presión en hormigones reciclados.

Profundizar en la evaluación del coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón respecto a la influencia de mayores espesores de la muestra en los resultados del ensayo.

Analizar hormigones con sustituciones mayores al 50% de árido reciclado, incorporando distintas adiciones minerales de manera que se reduzcan las cantidades de cemento en la mezcla para obtener un hormigón mas sostenible. La evaluación del uso de residuos agroindustriales u otros subproductos puede ser interesante.

Capítulo 10

Bibliografía

Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O., Razaqpur, A., Fournier, B., & Foo, S. (2006). Environmental benefits of green concrete. *Climate change conference*.

Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O., Razaqpur, A., Fournier, B., & Foo, S. (2008). Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM International*, 5 (1).

Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O., Razaqpur, A., Fournier, B., & Foo, S. (2009). Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement and Concrete Composites*, 31 (8), 555-563.

Abbas, A., Fathifazl, G., Fournier, B., Isgor, O., Zavadil, R., Razaqpur, A., y otros. (2009). Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. *Materials Characterization*, 716 – 728.

Abrams, D. A. (1919). Design of Concrete Mixtures. *Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Bulletin 1*, 20.

ACI 318. (2002). Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-02) and commentary (ACI 318R-02), . *American Concrete Institute*, 443.

ACI Committee 201. (2008). 201.2R-08: Guide to Durable Concrete. 49. USA.

ACI Committee 222. (2001). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, ACI 222R-01. En A. C. Institute. Michigan, USA: Farmington Hills.

Acker, A. (1998). Recycling of concrete at a precast concrete plant, Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. *Proceedings of the International Symposium* (págs. 321–332). London, United Kingdom,; Thomas Telford.

Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review. *Cement and Concrete Composites*, 25 (4–5), 459–471.

Ahmed, A. and Struble, L (1995). Effects of microstructure of fracture behaviour of hardened cement paste, Microstructure of Cement-based Systems/Bonding and Interfaces in Cementitious Materials. *Symposia Boston*, (págs. 99–108). Boston MA, USA.

Ajdkiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24 (2), 269-279.

Alaejos, P., & Bermudez, M. (2008). *Corrosión de las armaduras en el hormigón situado en ambiente marino. Estado del arte*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

Alonso, C., Castellote, M., & Andrade, C. (2002). Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. *Electrochimica Acta*, 47, 3469-3481.

Alonso, C., & Sanchez, M. (2009). Análisis de la concentración crítica de cloruros en la vida útil de las estructuras. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 26 (2), 519-524.

Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, 23 (3), 724 – 742.

Andrade, C., Segrera, J., Sanjuan, M., & Alonso, C. (1994). Calculo del periodo de iniciación de la corrosion en ambientes contaminados de cloruros. *ACHE*.

Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., & Gonzalez, C. (2000). Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation. *Materials and Structures*, 33, 21-28.

Andrade, C., Castellote, M., & d'Andrea, R. (2011). Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices. *Journal of Nuclear Materials*, 412 (1), 209-216.

Ann, K., Moon, H., Kim, Y., & Ryou, J. (2008). Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*, 28 (6), 993-999.

Ann, K., Ahn, J., & Ryou, J. (2009). The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. *Construction and Building Materials*, 23 (1), 239-245.

Arredondo-Rea, S., Corral-Higuera, R., Neri-Flores, M., Gómez-Soberón, J. M., Almeraya-Calderón, F., Castorena-González, J., y otros. (2011). Electrochemical Corrosion and Electrical Resistivity of Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *International Journal of Electrochemical Science*, 6, 475-483.

ASTM-C192. (2007). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

ASTM-C876. (2009). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. American Society for Testing and Materials.

ASTM-C1202. (2005). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

ASTM-C1218. (2008). Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.

ASTM-C1543. (2010). Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding. En *Annual book of ASTM Standards*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM-C1556. (2011). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. En *Annual book of ASTM Standards*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Böhmer, S., Moser, G., Neubauer, C., Meltoniemi, M., Schachermayer, E., Tesar, M., y otros. (2008). *Aggregates case study. Final Report referring to contract n° 150787-2007 F1SC-AT, Aggregates case study – data gathering*.

Bamforth, P. (1996). Predicting the risk of reinforcement corrosion in marine structures. *Corrosion Prevention and Control*, 43 (4), 91-100.

Barra M. (1996). *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Barra, M., & Vázquez, E. (1996). The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, 16 (1-3), 113-117.

Barra, M., & Vázquez, E. (1998). Properties of concrete with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation. *Proceeding of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, 19-30. London, UK.

Barth, H. (1994). Financial, economical and political aspects of the reuse of construction and demolition waste. . In: LAURITZEN, E. K. (Org.) *Demolition and reuse of concrete and masonry: Proceedings of the Third International RILEM Symposium* (pág. 552). London: Spon Pres.

Basheer, P. (1991). *'Clam' permeability tests for assessing the durability of concrete*. Northern Ireland, UK: Ph.D Thesis, The Queen's University of Belfast.

Basheer, P. A. (2001). *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology Principles, Techniques, and Applications. Permeation analysis*. (J. J. V.S. Ramachandran, Ed.) Canada.

Baweja, D., Roper, H., & Sirivivatnanon, V. (1996). *Corrosion of steel in marine concrete: long-term half-cell potential and resistivity data*. SP 163-3.

BCSJ. (1977). Proposed standard for the "use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete'.'. En B. C. waste. Japan.

BCSJ. (1978). Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Concrete Journal*, 16, 18-31.

Bermúdez, M. (2007). Corrosion de las armaduras del hormigon armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. *Tesis Doctoral* . Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.

Bermúdez, M. Á., & Alaejos, P. (2008). Comparative study of different test methods for reinforced concrete durability assessment in marine environment. *Materials and Structures*, 41, 527-541.

Berndt, M. (2009). Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2606-2613.

BOE, B. O. (2001). *Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006*. Madrid.

BOE, B. O. (2009). *Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015*.

Bolomey, J. (1935). Granulation et prevision de la resistance probable des betons. *Travaux* 19 (30), 228-232.

BRE, Building Research Establishment (1998). Recycled Aggregates - BRE digest No. 433.

- BRE, Building Research Establishment (2000). Corrosion of steel in concrete - durability of reinforced concrete structures. Digest 444 (part 1 to 3). Londres.
- BS, Building Research Establishment (1985). BS 6543: Use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering. BSI. London.
- BS_8500_2. (2002). Concrete Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete.
- Buck, A. D. (1977). Recycled Concrete as a Source of Aggregate. *Journal of the American Concrete Institute*, 41 (5), 212-220.
- Buck, A. (1973). Recycled concrete. *Highway Research Record* (430), 1-8.
- Bustillo, M. (2010). *Manual de RCD y áridos reciclados*. Madrid: Fueyo Editores.
- Butler, L., West, J., & Tighe, S. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 41, 1037-1049.
- Buyle-Bodin, F., & Hadjieva-Zaharieva, R. (2002). Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures*, 35 (8), 504-509.
- Castellote, M., Andrade, C. & Alonso, C. (2001). Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber Comparison with natural diffusion tests. *Cement and Concrete Research*, 31, 1411-1420.
- Castellote, M. & Andrade, C. (2006). Round-robin test on methods for determining chloride transport parameters in concrete. *Materials and structures*, 35, 955-990.
- Castellote, M., Andrade, C., & Alonso, C. (2002). Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. *Corrosion Science*, 44 (11), 2409-2424.
- CEB, Comité Euro-International du Béton (1998). *Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion*. Bulletin 243. Lausanne, Suiza.
- Cement & Concrete Association of Australia. (1989). *Durable Concrete Structures. Technical note no. 57*.
- Chakradhara, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44, 205-220.

CLEAM, CDTI, Centro Para el Desarrollo Tecnológico Industrial. Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medio Ambiente [Clean, Efficient and Environment-Friendly Construction] at <http://cleam.es/home.php>. 2011.

Clear, K. C. (1989). *Measuring rate of corrosion of steel in field concrete structures*. Technical report, Transportation Research Record 1211.

Consejería de Medio Ambiente, y Ordenación del Territorio. (2006-2016). *Estrategia de Residuos de la Comunidad de Madrid 2006-2016. Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición (2006 -2016)*. Comunidad de Madrid.

Corinaldesi, V. (2003). Recycled aggregate concrete under cyclic loading. Proceedings of the International Symposium on Role of Concrete in Sustainable Development. *University of Dundee (509–518)*. Scotland.

Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2869–2876.

Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24, 1616–1620.

Corral-Higuera, R., Arredondo-Rea, S. P., Neri-Flores, M., Gómez-Soberón, J. M., Almaral-Sánchez, J. L., Castorena-González, J., y otros. (2011). Chloride Ion Penetrability and Corrosion Behavior of Steel in Concrete with Sustainability Characteristics. *International Journal of Electrochemical Science*, 6, 958 - 970.

de Pauw, C. (1981). Fragmentation and recycling of reinforced concrete some research results, chapter 5.3.2, in P. Kreijger: "Adhesion problems in the recycling of concrete", . *NATO conference series IV (materials science), plenum press*, 311-317. New York.

de Schutter, G., & Audenaert, K. (2004). Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. *Material and Structures*, 37 (9), 591–596.

Debieb Farid, C. L. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23 (11), 3382-3387.

Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2010). Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32 (6), 421-426.

Dhir, R., Jones, M., Ahmed, H., & Seneviratue, A. (1990). Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 42 (152), 177-185.

Dhir, R., Limbachiya, M., & Leelawat, T. (1999). Suitability of recycled aggregate for use in BS5328 designated mixes. *Proc.-Inst. Civ. Eng.*, 134 (3), 257–274.

- Dhir, R., Limbachiya, M., & Leelawat, T. (1999). Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings*, 134 (3), 257–274.
- Dillmann, R. (1998). Concrete with recycled concrete aggregate. *In: Proceedings of international symposium on sustainable construction: use of recycled concrete aggregate*, (págs. 239–253). Dundee, Scotland.
- DIN_4226-100. (2002). Aggregates for mortar and concrete - Part 100: Recycled aggregates.
- Domingo, A., Lázaro, C., López, F., Serrano, M., Serna, P., & Castaño, J. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2545–2553.
- Draper, N., y H. Smith. *Applied Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozakia, K., & Narikawac, M. (2007). Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, 21 (7), 1542–1551.
- Elsener, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R., and Raupach, M. (2003). Half-cell potential measurements - potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, 36, 461–471.
- EN_206-1, E. S. (2000). Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. Bruselas.
- Etxeberria, M. (2004). *Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete. Tesis Doctoral*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., & Marí, A. (2006). Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine Concrete Research*, 58, 683–690.
- Etxeberria (a), M., Marí, A., & Vázquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40 (5), 529–541.
- Etxeberria (b), M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37 (5), 735–742.
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32, 9-14.
- Evans, U. (1960). *The corrosion and oxidation of metals; scientific principles and practical applications*. London: Ed. Arnold.

- Fagerlund, G. (1982). On the capillarity of concrete. *Nordic Concrete Research* , 1, 6.1 - 6.20.
- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A., Isgor, O., Fournier, B., & Foo, S. (2007). Proposed mixture proportioning procedure for recycled aggregate concrete. *Proc Int Conf on Sustainable Construction. Materials and Technologies*. Coventry, England.
- Fathifazl, G. (2008). *Structural performance of Steel reinforced recycled concrete members*. Ottawa, Canada: Phd dissertation, Carleton University.
- Fathifazl, G., Ghani Razaqpur, A., Burkan Isgor, O., Abbas, A., Fournier, B., & Foo, S. (2011). Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. *Cement & Concrete Composites* , 33 (10), 1026–1037.
- Fernández, M. (2004). *Hormigón* (Legal deposit: M-1696-1989 7th edition ed.). (C. y. Colegio de Ingenieros de Caminos, Ed.) España.
- Ferreira, R. (2004). *Probability – based durability analysis of concrete structures in marine environmental*. Tesis Doctoral. Universidade do Monho. Escola de Engenharia.
- Freedonia. (2007). *World Construction Aggregates. Industry Study with Forecasts for 2011 & 2016* (Vol. Study #2272). USA.
- Freedonia. (2012). *World Construction Aggregate to 2015* (Vol. Study # 2838). USA.
- Frondistou-Yannas, S. (1977). Waste concrete as aggregate for new concrete. *ACI Journal* , 5, 373–376.
- Güneyisi, E., Özturan, T., & Gesoglu, M. (2007). Effect of initial curing on chloride ingress and corrosion resistance characteristics of concretes made with plain and blended cements. *Building and Environment* , 42 (7), 2676–2685.
- Gállego Estévez, J. (1998). *Los procesos de corrosión de las armaduras. En CEDEX. Curso sobre durabilidad y reparación de estructuras de hormigón*. Madrid.
- GEAR project. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2011). Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD [Spanish Guide to Recycled Aggregates from C&D waste] at <http://www.proyectogear.com>. Spain.
- GEHO, Grupo Español del Hormigón (1996). *Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño CEB, boletín GEHO no 12*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (2a ed.).
- GERD. (2010). *Control de los Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en los Ayuntamientos*. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición.

Glushge, P. (1946). The work of the Scientific Research Institute. *Gidrotskhnicheskoge Stroitelstvo* No.4, April 1946, p. 27-28 (U.S.S.R.) . *Brief English summary in Engineers Digest* , 7 (10), 330.

Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., & Hisada, M. (2011). Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete. *Construction and Building Materials* , 25 (5), 2426–2431.

Gomez-Soberon, J. M. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate – An experimental study. *Cement and Concrete Research* , 32 (8), 1301-1311.

Gonçalves, A., Esteves, A., & Vieira, M. (2004). Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. *RILEM Proceedings PRO 40: use of recycled materials in buildings and structures*. Portugal,.

González, J. A., & Miranda, J. (2007). *Corrosión en las estructuras de hormigón armado: Fundamentos, Medida, Diagnóstico y Prevención*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC.

Gonzalez, B., & Martinez, F. (2004). Shear strength of concrete with recycled aggregates. *International RILEM Conference on the 'Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*. Barcelona, Spain.

González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2005). Recycled Aggregates Concrete: Aggregate and Mix Properties. *Materiales de Construcción* , 55 (279), 53-66.

González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2007). Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials* , 21 (4), 887-893.

González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume: materials and mechanical properties. *Building and Environment* , 43 (4), 429–437.

Graf, O. (1948). Über Ziegelsplittbeton, Sandsteinbeton und Trummerschuttbeton. *Die Bauwirtschaft*, No 2, January No 3, February No 4, March 1948 .

Guzmán, S. (2010). *Modelización del deterioro de tableros de puentes de hormigón por difusión de cloruros y corrosión de la armadura pasiva*. Madrid: Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Hansen, T., & Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International - design and construction* , 5 (1), 79-83.

Hansen, T. (1985). Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *ACI J* , 82 (5), 648–652.

Hansen T.C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report, developments 1945-1985. . *Materials Structural RILEM* , 19 (111), 226-229.

Hansen, T. (1992). Recycling of demolished concrete and masonry. *RILEM Rep. No. 6*. London, UK.: E&FN Spon.

Ho, D. (2003). *Durability of Concrete*. In W. F. Chen & J. Y. R. Liew (Eds.), *The civil engineering handbook* (2nd ed. ed.). Boca Raton, London, New York, Washington D.C.

Isgor, O. B. (2001). *A durability model for chloride and carbonation induced steel corrosion in reinforced concrete members*. Ottawa, Ontario, Canada: Ph.D. Thesis, Carleton University.

Izquierdo, D. (2003). *Bases de diseño para un tratamiento probabilista de los procesos de corrosión de armaduras en el hormigón*. Tesis Doctoral. Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

Jiménez, P., García, A. y Morán, F. *Hormigón Armado*. (Gustavo Gili) 2001: 27-59.

Kakizaki, M., Harada, M., Soshiroda, T., Kubota, S., Ikeda, T., & Kasai, Y. (1988). Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete. In: *Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on demolition and reuse of concrete and masonry* (págs. 565-574). Tokyo, Japan: .

Kasai, Y. (June de 1985). Studies into the reuse of demolished concrete in Japan. . *EDA/RILEM demo-recycling conference, proc. 22 "re-use of concrete and brick materials", European Demolition Association* .

Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research* , 33 (5), 703-711.

Katz, A. (2004). Treatments for the improvement of recycled aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering* , 16 (6), 597-603.

Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2004). Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering* , 331, 331-340.

Kheder, G. F., & Al-Windawi, S. A. (2005). Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete as related to the strength of their binding mortar. *Materials and Structures* , 38 (7), 701-709.

Kikuchi, M., Dosho, Y., Yasunaga, T., Ebara, K., & Masuda, A. (1995). Influence of quality of recycled aggregate on quality of recycled aggregate concrete. *Journal Structures and Construction Engineering (Trans AIJ)* , 474, 11-20.

- Kong, D., Zhen, J., & Zhou, X. (2006). Strengthening of the ITZ in recycled aggregate concrete. In: *Xi'an international conference on architecture and technology, proceedings – architecture in harmony, Xian, PRC*, (págs. 614–617).
- Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., & Jiang, J. (2010). Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24 (5), 701-708.
- Kou, S., Poon, C., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (9), 709–718.
- Kou, S., & Poon, C. (2010). Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32, 649-654.
- Kou (a), S.-c., Poon, C.-s., & Agrela, F. (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33 (8), 788–795.
- Kou, S.-C., Poon, C.-S., & Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33 (2), 286-291.
- Kwan, W., Ramli, M., Kam, K., & Sulieman, M. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties . *Construction and Building Materials*, 26, 565–573.
- Lanza, V., Bermudez, M., & Alaejos, P. (2005). Estudio comparativo de ensayos químicos para la medida de cloruros solubles en el hormigón. *V Congreso Ibérico de Geoquímica*. Soria: Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas.
- Levy, S. M., & Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development . *Cement and Concrete Research*, 34 (11), 1975-1980.
- Li, J., Xiao, H., & Zhou, Y. (2009). Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction Building Materials*, 23 (3), 1287–1291.
- Li, X. (2009). Recycling and reuse of waste concrete in China: Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 53 (3), 107–112.
- Limbachiya, M., Leelawat, T., & Dhir, R. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33 (9), 574-580.

Limbachiya, M., Koulouris, A., Roberts, J., & Fried, A. (2004). Performance of recycled aggregate concrete. *RILEM international symposium on environment-conscious materials and systems for sustainable development* (págs. 127-136). Tokyo: RILEM.

Limbachiya, M., Marrocchino, E., & Koulouris, A. (2007). Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management* , 27 (2), 201-208.

Limbachiya, M., Meddah, M. S., & Ouchagour, Y. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete . *Construction and Building Materials* , 27, 439–449.

Lin, Y.-H., Tyan, Y.-Y., Chang, T.-P., & Chang, C.-Y. (2004). An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research* , 34 (8), 1373-1380.

Liu, Z., & Beaudoin, J. (2000). The permeability of cement systems to chloride ingress and related test methods. *Cement Concrete and Aggregates* , 22, 16-23.

Long, A. E., Henderson, G., & F.R., M. (2001). Why assess the properties of 309 near-surface concrete? *Construction and Building Materials* , 15 (2-3), 65-79.

López-Gayarre, F. (2008). *Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas*. Universidad de Oviedo. Tesis doctoral.

López-Gayarre, F., López-Colina, C., Serrano-López, M., García-Taengua, E., & López-Martínez, A. (2011). Assessment of properties of recycled concrete by means of a highly fractioned factorial design of experiment. *Construction and building materials* , 25, 3802-3809.

Malašev, M., Radonjanin, V., & Marinkovid, S. (2010). Recycled Concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* , 2, 1204-1225.

Malheron, M., & O'Mahony, M. (1988). The Durability of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, (págs. 633-642). Tokyo, Japan.

Malhorta, V. (1976). Use of Recycled Concrete as a new Aggregate . *Canadian Center of Mineral and Energy Technology* .

Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & I, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management* , 30 (11), 2255–2264.

- Martínez Suárez, B. (2002). *Consideraciones sobre la Relación AGUA/CEMENTO en la Instrucción EHE*. Grupo de Trabajo "Revisión EHE" (ANEPHOP), Rev. 2 Por cortesía de la revista Hormigón Preparado .
- McGrath, P., & Hooton, R. (1996). Influence of voltage on chloride diffusion coefficient from chloride migration tests. *Cement Concrete Research* , 26 (8), 1239–1244.
- Mehta, P., & Monteiro, P. (1986). *Concrete. Structure, Properties and Materials*. Prentice Hall.
- Mehta, P. (October de 2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International Journal* , 61-66.
- Mehta, P. M. (2005). *Concrete: microstructure, properties and materials* (3rd ed.). McGraw Hill.
- Mejia, R., & Rodriguez, P. (1999). *Durabilidad y corrosión en materiales cementicios*. Costa Rica: Seminario Internacional. CYTED.
- Mellmann, G. (1999). Processed concrete rubble for the reuse as aggregate. *In: Proceedings of the international seminar on exploiting waste in concrete*, (págs. 171–178). Dundee, Scotland.
- Ministerio de Fomento de España. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08. *Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, publicado el 22 de agosto (203)* . (BOE, Ed.) España.
- Moriconi, G., & Corinaldesi, V. (2005). Rheological study of blended cement concrete. *In: Dhir RK, Harrison TA, Newlands MD, editors. Cement combinations for durable concrete, Proc 6th int congress on global construction: ultimate concrete opportunities*, (págs. 211–218). Scotland/London (UK): Dundee/Thomas Telford.
- Mulder, E., de Jong, T. P., & Feenstra, L. (2007). Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Management* , 27, 1408–1415.
- Mymrin, V., & Correa, S. M. (2007). New Construction materials from concrete production and demolition wastes and lime production waste. *Construction and Building Materials* , 21, 578-582.
- Nealen, A., & Schenk, S. (1998). The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties. *Darmstadt Concrete* , 13.
- Neville, A. (1996). *Properties of concrete*. New York: (4th ed.) John Wiley & Sons.
- Neville, A. (1988). *Tecnología del concreto (Properties of concrete)* (Vol. 2). Limusa.
- Newman, A. J. (1946). The utilisation of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete. *Institute for Municipal Engineering* , 73 (2), 113-121.

Ng, K.-h., Tam, C.-m., & Tam, V. W.-y. (2006). Deformation and Sorptivity of Recycled Aggregate Concrete Produced by Two Stage Mixing Approach. *Surveying and Built Environment*, 17 (1), 7-14.

Nilsson, L. O. (1996). Chloride Penetration into Concrete, State- of-the-Art, Transport Processes, Corrosion Initiation, Test Methods and Prediction Models. *The Report No. 53*, 4-16.

Nishibayashi, S., & Yamura, K. (1988). Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete. *Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, (págs. 652-659). Tokyo, Japan.

Nixon, P. (1978). *Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete – A Review*, RILEM TC-37-DRC. (Vol. 11). Materials and Structures (RILEM).

NT BUILD 492. (November de 1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experimentsd.

NT-BUILD-443. (1995). Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration. 1-5.

NT-BUILD-492. (November de 1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experimentsd.

NTC. (2008). *Norme Tecniche per le costruzioni, D.M. 14/01/2008*.

Oh, B., Jang, S., & Shin, Y. (2003). Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*, 55 (2), 117-124.

Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27, 315-318.

Olorunsogo, F., & Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, 32 (2), 179-185.

Oloukun, F., Burdette, E., & Deatherage, J. (1991). Elastic modulus, Poisson's ratio and compressive strength relationships at early ages. *ACI Material Journal*, 88, 3-10.

Otsuki, N., Miyazato, S., & Yodsudjai, W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal Material Civil Engineering*, 15 (5), 443-451.

Page, C. T. (1990). *Corrosion of Reinforcement in Concrete, Proceedings 3rd International Symposium*. London, UK: Society of Chemical Industry.

Parekh, D., & Modhera, C. (2011). Assessment of recycled aggregate concrete. *Journal of Engineering Research and Studies*, II (I), 1-9.

- Peluso, M., Domingo, A., Ulloa, V., & Vergara, N. (2009). *Analysis of moisture state of recycled coarse aggregate and its influence on compression strength of the concrete*. Valencia, Valencia, España: Shell and Spatial Structures IASS.
- Poon, C., Shui, Z., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18, 461-468.
- Poon, C., Shui, Z., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 31-36.
- Poon, C., Kou, S., & Chan, D. (2006). Influence of steam curing on hardened properties of recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58, 289-299.
- Poon, C., Qiao, X., & Chan, D. (2006). The cause and influence of self-cementing properties of recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Management*, 26, 1166-1172.
- Poon, C., & Chan, D. (2007). Effect of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 21, 164-175.
- Pourbaix, M. (1966). *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. New York: Pergamon.
- Prabakar, J., Devadas Manoharan, P., & Chellappan, A. (2010). Diffusion characteristics of OPC concrete of various grades under accelerated test conditions. *Construction and Building Materials*, 24 (3), 346-352.
- Pryce-Jenkins, V. (2011). *A comparative review of the latest experimental research on the use of recycled concrete aggregate in structural concretes*. MSc Civil Engineering, Civil, Environmental and Geomatic Engineering, London.
- Qin, H. Z. (2011). Experimental study on the Chloride Diffusivity of recycled aggregates concrete. *Materials Research*, 168 (170), 1404-1408.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42 (1), 407-415.
- Rasheeduzzafar, K. A. (1984). Recycled concrete - a source of new aggregate. *Cement, Concrete, and Aggregates (ASTM)*, 6 (1), 17-27.
- Ravindrarajah, R., & Tam, T. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37 (130), 29-38.

Ravindraiah, R. S., Loo, Y. H., & Tam, C. T. (1988). Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests. *Materials and Structures*, 21, 289-295.

Richardson, A., Coventry, K., & Bacon, J. (2011). Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 19, 272-277.

RECNHOR. Ministerio de Medio Ambiente (2008). Estudio experimental prenormativo sobre la utilización de los RCDs en hormigón reciclado de aplicación estructural RECNHOR. 3.2358/2005/3-B.

RILEM, International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. (1988). *Corrosion of steel in concrete: report of the Technical Committee 60 CSC.* : P. Schiessl. Chapman and Hall.

RILEM, , International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. (1992). Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. En T. Hasen, *Recycling of Demolished Concrete and Masonry. RILEM Report 6*. London: E&FN Spon.

RILEM, , International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. (1994). Specifications for Concrete with Recycled Aggregates (RILEM TC-121 DRG). *Materials and Structures*, 27 (173), 557-559.

RILEM, , International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. (1995). *Performance Criteria for Concrete Durability. Report 12*. (J. Kropp, and H. K. Hilsdorf, eds.), E&FN Spon.

Ryu, J. (2002). Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Journal of Materials Science Letters*, 21, 1565-1567.

Sánchez, M. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Madrid, España: Tesis Doctoral, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).

Sánchez, M., & Alaejos, P. (2006). *Estudio sobre las propiedades del árido reciclado. Utilización en Hormigón Estructural*. España: Ministerio de Fomento y Cedex. España.

Sánchez, M., & Alaejos, P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23 (2), 872-877.

Sagoe-Crentsil, K., Brown, K., & Taylor, A. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31 (5), 707-712.

- Sandberg, P. (1998). *Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete. Report TVBM- 1015*. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund, Suecia.
- Scrivener, K., & Pratt, P. (1996). *Characterization of Interfacial Micro- structure, RILEM Report 11, Interfacial Transition Zone in Concrete*. E & FN SPON.
- Serna P., U. V. (2009). *Analysis of roller compacted pavements made from recycled concrete aggregate for use in Spain*. Sao Paulo, Brazil: Proceedings of RILEM 2009: International Rilem Conference on Progress of Recycling in the Built Environment.
- Shi, X., Xie, N., Fortune, K., & Gong, J. (2012). Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*, 30, 125–138.
- Sim, J., & Park, C. (2011). Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Management*, 31 (11), 2352-2360.
- Somna, R., Jaturapitakkul, C., & Rattanachu, P. (2011). Effect of w/b ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Song, G., & Shayan, A. (1998). *Corrosion of Steel in concrete: causes, detection and prediction. State of the art review* (Vol. Review Report 4). ARRB Transport Research Ltd.
- Soutsos, M., Tang, K., & Millard, S. (2011). Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. *Construction and building materials*, 25, 3131-3143.
- Stern, M., & Geary, A. (1957). Electrochemical Polarization. *Journal of The Electrochemical Society*, 104 (1), 56-63.
- Streicher, P. (1996). *Durability of marine cements, Final Project Report*, . University of Cape Town, Department of Civil Engineering.
- Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (2), 1163–1167.
- Takenaka Corporation. (1999). *High-quality Recycled Aggregate "Cyclite" Acquires First Approval of Innovative Building Technologies from Building Center of Japan*.
- Tam, V. W., Gao, X., & Tam, C. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35, 1195–1203.
- Tam, V. W., & Tam, C. (2007). Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 21 (4), 879-886.

Tam, V. W., Tam, C., & Le, K. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling* , 50, 82–101.

Tam, V. W., K., W., & C.M., T. (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials* , 152 (2,1), 703-714.

Tam, V. W., Gao, X., Tam, C., & Chan, C. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials* , 22 (3), 364-369.

Tam, V. W., Gao, X., Tam, C., & Ng, K. (2009). Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete. *Journal of Hazardous Materials* , 163 (2-3), 823-828.

Tang, L. A. (1992). Chloride diffusivity in high strength concrete at different ages. *Nordic Concrete Research* , 11, 162-171.

Tang, L. a. (1992). Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electric Field,. *ACI Materials Journal* , 89 (1), 49–53.

Tang, L. (1996). *Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction. PhD-thesis* (Vols. Report P-96:6). Gothenburg: Chalmers University of Technology.

Tang, L., & Sorensen, H. E. (2001). Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete. *Materials and Structures* , 34, 479-485.

Tazawa, E., Kasai, T., & Okamoto, S. (1989). Compressive strength of concrete prepared by double mixing. *Journal Materials Construction Structure. Pavements* , 408 (11), 139–146.

The Concrete Society. (1988). Permeability Testing of Site Concrete—A Review of Methods and Experience,. *Report of a Concrete Society Working Party, Concrete Society Technical Report No. 31* , 95.

Topcu, I., & Güncan, N. (1995). Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research* , 25 (7), 1385–1390.

Topçu, I. B., & Sengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research* , 34, 1307–1312.

Tu, T.-Y., Chen, Y.-Y., & Hwang, C.-L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates . *Cement and Concrete Research* , 36, 943–950.

Tuutti, K. (1982). Corrosion of steel in concrete. *Swedish Cement and Concrete Research Institute* , 145-152.

Uchikawa, H., & Hanehara, S. (1996). Recycling of concrete waste, . En T. D. R.K. Dhir, *Concrete for Environment Enhancement and Protection* (págs. 163–172). London: E&FN SPON.

- Uhlig, H. (1970). *Corrosión y control de corrosión*. (E. Aguilar, Trad.) Bilbao: Urmo.
- UEPG, E. A. (2007). *The European Aggregates Industry – Annual Statistics 2006*.
- Ulloa, V., Domingo, A., Pelufo, M., & Serna, P. (2009). Durability of recycled aggregate concrete. An approach to influence of dosage condition on the permeability. Methodology propose of rebars corrosion analysis. *2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment* , 411 – 422.
- UNE 83987. (2009). Determinación de los coeficientes de difusión de iones cloruro en el hormigón endurecido. Método Multirrégimen. En *Durabilidad del Hormigón. Métodos de ensayo*. . España.
- UNE-EN_12350-2. (2009). Ensayos de hormigón fresco. En E. d. asentamiento.
- UNE-EN_12390-3. (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- UNE-EN_12390-6. (2010). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.
- UNE-EN_12390-7. (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido.
- UNE-EN_12620. (2009). *Áridos para hormigón*. Madrid: AENOR.
- UNE-EN-14629. (2007). Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. En *Métodos de ensayo. Determinación del contenido en cloruros en el hormigón endurecido*.
- UNE-EN_933-11. (2009). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- Vázquez, E., Barra, M., Valls, S., & Aponte, D. (2011). Succión Capilar. En P. Alaejos, M. Sánchez, F. Martínez, B. González, E. Vázquez, M. Barra, y otros, *Estudio prenормativo sobre la utilización de los RCD's en hormigón reciclado de aplicación estructural (Proyecto RECÑHOR) y Reciclado de los RCD's como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM)* (Vol. Sostenibilidad, pág. 132). Madrid, España: IECA.
- Venkatesan, P. P. (2006). Corrosion performance of coated reinforcing bars embedded in concrete and exposed to natural marine environment. *Progress in Organic Coatings* , 56 (1), 8-12.

Wagner, C., & Traud, W. (1938). Zeitschrift fur elektrochemie und angewandte physikalische chemie. *Z. Elektrochem* , 44 (7), 391.

Xiao, K., Lin, Z., Wan, H., & Yang, L. (2004). Study on chloride ion penetration resistance of recycled aggregate concrete. *Shandong Building Materials* , 25, 31-33.

Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research* , 35 (6), 1187-1194.

Xiao, J., Sun, Y., & Falkner, H. (2006). Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. *Engineering Structures* , 28 (1), 1-8.

Xiao, J.-Z., Li, J.-B., & Zhang, C. (2006). On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview. *Materials and Structures* , 39, 655-664.

Xiao, J., & Falkner, H. (2007). Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars. *Construction and Building Materials* , 21 (2), 395-401.

Xiao, J., Li, W., Fan, Y., & Huang, X. (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Construction and Building Materials* , 31, 364–383.

Xiao, J., Ying, J., & Shen, L. (2012). FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* , 29, 12–23.

Yagishita, F., Sano, M., & Yamada, M. (1994). Behaviour of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate. In: Erik K. Lauritzen, Editor, *Demolition and reuse of concrete, Rilem*, (págs. 331–342).

Yamato, T., Soeda, M., & Emoto, Y. (2000). Physical properties of recycled aggregate and the utilization as concrete aggregate. *International Seminar on Recycled Concrete. Sponsored by Niigata University and Japan Concrete Institute (JCI)*, (págs. 59-68).

Yang, C., & Weng , T. (2003). Using charge passed to determine the chloride diffusion coefficient in mortar from accelerated chloride migration test . *Construction and Building Materials* , 17 (4), 231-238.

Yang, C., Chiang, S., & Wang, L. (2007). Estimation of the chloride diffusion from migration test using electrical current. *Construction Building Matererials* , 21 (7), 1560–1567.

Yang, K.-H., Chung, H.-S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *ACI Materials Journal* , 289-296.

Yaprak, H., Aruntas, H., Demir, I., Simsek, O., & Durmus, G. (2011). Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *International Journal of the Physical Sciences*, 6, 2455- 2461.

- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., & Wirquin, E. (2003). Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25 (2), 223–232.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., & Wirquin, E. (2004). Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 34 (10), 1927–1932.
- Zega, C., Taus, V., & Di Maio, A. (2006). Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado. *IMME*, 44 (3), 17-26.
- Zega, C., & Di Maio, A. (2011). Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregate. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 281-286.
- Zhang, M., & GjØrv, O. (1991). Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, 88 (5), 463–469.
- Zhang, B. (1998). Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue. *Cem. Concr. Res.*, 28 (5), 699–711.
- Zhang, R., Castel, A., & François, R. (2010). Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, 40, 415-425.
- Zhu, Y.G., Dai J.G., & Li Q.Y. (2011). Chloride Diffusion Property of Recycled Aggregate Concrete Treated with Water Repellent Agents-Silane. *Materials Research*, 168 (170), 755-761.
- Zilch, K., & Roos, F. (2001). An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates. *Civil Engineering*, 76 (4), 187–191.

