



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

**Estudio de la durabilidad en
hormigones con áridos reciclados.
Aspectos relativos a la penetración
de agua y de cloruros**

Treball realitzat per:

Daniel Sarcina Galan

Dirigit per:

Dr. Diego Fernando Aponte

Dra. Marilda Barra Bizinotto

Màster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, febrero de 2017

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

**ESTUDIO DE LA DURABILIDAD EN HORMIGONES CON
ÁRIDOS RECICLADOS. ASPECTOS RELATIVOS A LA
PENETRACIÓN DE AGUA Y DE CLORUROS**

Autor

DANIEL SARCINA GALAN

Tutores

Dra. MARILDA BARRA

Dr. DIEGO APONTE

Universidad Politécnica de Cataluña

Ingeniería Civil y Ambiental

Barcelona, febrero 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento a mis tutores, Marilda Barra Bizinotto por otorgarme la oportunidad de formar parte de su equipo de investigación y Diego Fernando Aponte por su orientación en todas las actividades involucradas en la campaña experimental y transmisión de información trascendental para la elaboración de este documento. Agradezco a ambos la excelente coordinación y mecánica de trabajo que permitió que todas las actividades se desarrollaran de forma óptima.

Agradezco a la técnico de laboratorio, Patricia Muñoz, cuya colaboración fue de vital importancia para la ejecución de diversas actividades asociadas a la campaña experimental.

Igualmente extiendo mi agradecimiento al estudiante de intercambio de ingeniería civil de la Universidad de Tecnología de Nagaoka (Japón), Harunobu Taki quien fue partícipe de las actividades experimentales desarrolladas para la elaboración de este documento.

Finalmente agradezco a mi familia. A mis padres que son el pilar más importante en mi vida por su apoyo incondicional y un referente ético intachable. A mi esposa por su apoyo y compañía, que han sido esenciales para superar exitosamente este camino, que como muchos otros nos hemos propuesto a transitar juntos. A mis hermanos, quienes son mis compañeros de vida inseparables y cuyo apoyo siempre está igualmente presente.

RESUMEN

El hormigón, debido a su resistencia y bajo coste se convirtió, desde hace tiempo, en el material de construcción predominante. La fabricación del hormigón, ligada al constante crecimiento del sector construcción, demanda cada vez mayores cantidades de recursos naturales que la hacen insostenible desde el punto de vista ambiental. Además, aunque los residuos de este material son considerados inertes, estos se generan en cantidades que superan a las de residuos provenientes de otras industrias.

Una de las alternativas que podría hacer del hormigón un material más sostenible es la utilización de áridos reciclados provenientes de los residuos de construcción y demolición de otras estructuras de hormigón. Sin embargo, la utilización de este tipo de áridos tiene repercusiones en las principales propiedades del mismo, las cuales, demandan mayores cantidades de cemento para ser similares a las del hormigón fabricado con áridos naturales, lo que podría afectar la durabilidad y los costes de la estructura. Además, la fabricación de cemento genera grandes cantidades de dióxido de carbono, un importante gas de efecto invernadero. Un novedoso método de dosificación llamado “Volumen de Mortero Equivalente” resuelve este problema ya que considera el mortero adherido en los áridos como parte integral del mortero requerido en el nuevo hormigón, reduciendo así las cantidades de cemento necesarias para la fabricación de hormigones con áridos reciclados.

Como consecuencia directa de lo innovador del método, se plantea estudiar las propiedades de durabilidad del hormigón, especialmente las relativas al transporte de agua y humedad, y la penetración de cloruros en hormigones fabricados con áridos reciclados bajo este método de dosificación y otros tradicionales, y compararlas con las de un hormigón control fabricado con áridos naturales. Para tal fin se llevó a cabo una campaña experimental constituida por dos ensayos de transporte de agua y humedad ya que estos representan los principales medios a través de los cuales penetran agentes agresivos para el hormigón o las armaduras embebidas. Además, se realizaron dos ensayos concernientes a uno de los principales mecanismos de deterioro de las armaduras y reducción de la vida útil de las estructuras, que es la penetración de cloruros.

Dentro de los ensayos de transporte de agua y humedad se incluye el de succión capilar y secado, a través del cual se pueden determinar parámetros como el de la densidad, la absorción y la porosidad a partir de datos obtenidos de los procesos de absorción de agua del hormigón en relación con el tiempo y pérdida de masa como resultado de un proceso de secado unidimensional de los especímenes inicialmente saturados. Además se llevó a cabo un ensayo de adsorción/desorción a través del cual pueden determinarse los mismos parámetros mediante la medición del incremento y

pérdida de masa del espécimen como una función del tiempo, por captación o liberación respectivamente, de humedad del ambiente.

Los aspectos relativos a la penetración de cloruros se evaluaron mediante los ensayos de fijación de cloruros y difusión de cloruros. El primero tiene como objetivo principal determinar y comparar las capacidades de fijación química y física de cloruros de los hormigones con áridos reciclados y naturales mediante la incorporación de cloruros posteriormente a la hidratación del cemento. Por otro lado, el ensayo de difusión de cloruros tiene como propósito determinar la resistencia a la penetración de cloruros por difusión pura en los hormigones endurecidos y saturados, a partir de los perfiles de penetración de cloruros, el coeficiente de difusión de cloruros efectivo, y las condiciones de contorno de la superficie expuesta.

De los estudios de transporte de humedad se obtuvieron diversos resultados concluyentes que apuntan a que el hormigón reciclado diseñado con la nueva metodología alcanza propiedades de durabilidad similares a las del hormigón con áridos naturales, mientras que el hormigón reciclado diseñado con metodologías clásicas muestra un comportamiento ligeramente distanciado de los otros dos tipos y que permite deducir que su rendimiento en aspectos asociados a la durabilidad podría ser inferior. De igual forma, los ensayos realizados con cloruros indican que en el hormigón reciclado por el método del volumen de mortero equivalente, tanto la fijación como la penetración de cloruros por difusión pura son similares a las del hormigón convencional, y mayores en el hormigón reciclado por métodos clásicos.

ABSTRACT

Because of its strength and low cost, concrete has long been the predominant building material. The manufacture of concrete, linked to the constantly growing construction sector, demands large quantities of natural resources that makes it unsustainable from the environmental point of view. In addition, although concrete waste is considered inert, it is generated in amounts that exceed those from other industries.

One of the options that could make concrete a more sustainable material is the use of recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW) from other concrete structures. However, the use of this type of aggregates has consequences on the main properties of concrete, therefore larger amounts of cement are needed in order to be similar to those with natural aggregates, but it could affect the durability and cost of the structure. Moreover, the manufacture of cement generates big amounts of carbon dioxide, an important greenhouse gas. A novel dosing method called "Equivalent Mortar Volume" solves this problem since it considers the mortar adhered in the aggregates as an integral part of the required mortar in the new concrete, thus reducing the quantities of cement required for the manufacture of concrete with recycled aggregates.

Due to the novelty of the method, it is proposed to study the durability properties, especially those related with the transport of water and moisture, and chloride penetration into the concrete made with recycled aggregates under this dosing method and other traditional ones, and compare them with a concrete made with natural aggregates. To this end, an experimental campaign was carried out consisting of two moisture transport tests, as it represents the main media through which aggressive agents penetrate into the concrete, as well as two tests to measure the penetration of chlorides, which is one of the main mechanisms of deterioration of the reinforcement and reduction of the lifetime service of the structures.

The moisture transport assessment includes the capillary suction and drying test to determine some parameters such as density, absorption and porosity from the absorption ratio of the concrete as a function of the time and subsequently the loss of mass as a result of a one-dimensional drying process of the initially saturated specimens. In addition, the adsorption/desorption test was carried out, through which the same parameters can be determined by the measurement of increase and loss of mass of the specimen as a function of time by uptake or release humidity from/to the environment.

The chloride penetration was assessed through chloride binding and chloride diffusion tests. The first one aims to determine and compare the chemical and physical chloride binding capacities of concretes made with recycled and natural aggregates through the incorporation of chlorides after the cement hydration. On the

other hand, the chloride diffusion test seeks to determine the chloride penetration resistance by pure diffusion in hardened and saturated concretes from the chloride profiles, the effective chloride diffusion coefficient and the boundary condition at the exposed surface.

From the moisture transport tests have been obtained several results that suggest that the recycled concrete designed with the new methodology and the concrete with natural aggregates reach similar durability properties, whereas the recycled concrete designed with classic methodologies show a slightly detached behavior from the other two types and it allows to deduce that its performance in terms of durability could be worst. Similarly, the tests carried out with chlorides indicate that in the recycled concrete designed by the Equivalent Mortar Volume method, both the chloride binding and the penetration of chlorides by pure diffusion are similar to those of conventional concrete, and higher in the recycled concrete designed by classical methods.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ESTUDIO DE LA DURABILIDAD EN HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS. ASPECTOS RELATIVOS A LA PENETRACIÓN DE AGUA Y DE CLORUROS.....I

| | |
|--------------------------|-----|
| AGRADECIMIENTOS | i |
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | vi |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | xii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiv |

1 INTRODUCCIÓN.....1

2 OBJETIVOS..... 4

2.1 Objetivo principal 4

2.2 Objetivos específicos..... 4

3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO 7

3.1 Durabilidad del hormigón 7

3.1.1 El cemento y las reacciones de hidratación 8

3.1.2 Mecanismos de deterioro del hormigón 9

3.1.3 Consideraciones y estrategias de durabilidad 13

3.2 Corrosión del acero.....15

3.3 Vida útil de una estructura17

3.4 Áridos reciclados21

3.4.1 Diseños de mezcla en hormigones con áridos reciclados 24

3.4.2 Propiedades de durabilidad de hormigón con áridos reciclados 25

3.5 Fijación de cloruros25

3.5.1 Factores que influyen la fijación de cloruros..... 27

3.6 Procesos de absorción y transporte de agua en el hormigón29

4 MATERIALES Y METODOLOGÍA.....33

4.1 Materiales.....33

4.1.1 Hormigón..... 33

4.1.2 Agua destilada y ultra pura..... 37

4.1.3 Reactivos 37

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1.4 | Impermeabilizantes de probetas | 37 |
| 4.2 | Metodología..... | 38 |
| 4.2.1 | Preparación de las muestras..... | 38 |
| 4.2.2 | Procedimiento de ensayo de fijación de cloruros | 39 |
| 4.2.3 | Procedimiento de ensayo de difusión de cloruros..... | 42 |
| 4.2.4 | Procedimiento de ensayo de succión capilar y secado | 44 |
| 4.2.5 | Procedimiento de ensayo de adsorción desorción | 48 |
| 5 | <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</u> | 51 |
| 5.1 | Contenido inicial de cloruros total | 51 |
| 5.2 | Densidad, absorción y porosidad..... | 51 |
| 5.3 | Absorción de agua por succión capilar y pérdida por secado | 55 |
| 5.3.1 | Succión capilar..... | 55 |
| 5.3.2 | Secado..... | 58 |
| 5.4 | Adsorción y desorción | 59 |
| 5.5 | Fijación de cloruros | 68 |
| 5.6 | Difusión de cloruros | 77 |
| 6 | <u>CONCLUSIONES.....</u> | 86 |
| 7 | <u>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</u> | 90 |
| 8 | <u>REFERENCIAS</u> | 92 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Diseños de mezcla de los hormigones ensayados (Jimenez, 2015)..... | 35 |
| Tabla 2. Contenido inicial de cloruros totales en % del peso | 51 |
| Tabla 3. Succión capilar inicial de cada tipo de hormigón | 57 |
| Tabla 4. Valores medidos de cloruros fijados por tipo de hormigón y molaridad ... | 76 |
| Tabla 5. Parámetros de concentración del ensayo de difusión de cloruros | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Diagramas de Pourbaix para el Zinc y el Hierro con regiones de inmunidad, corrosión y pasivación (Pourbaix, 1974)..... | 16 |
| Figura 2. Volumen de los productos de corrosión con respecto al hierro, adaptado de Poursaee (2016)..... | 17 |
| Figura 3. Comparación de las zonas de transición interfase (ZTI) de áridos naturales y reciclados, traducido de Otsuki, Miyazato & Yodsudjai (2003) | 22 |
| Figura 4. Densidad del hormigón en estado endurecido, adaptado de Jimenez (2015) | 36 |
| Figura 5. Resistencia a la compresión de los hormigones estudiados, adaptado de Jimenez (2015)..... | 36 |
| Figura 6. Verificación de la no carbonatación de los hormigones | 38 |
| Figura 7. Recipientes con muestras de los tres tipos de hormigón en solución de NaCl | 40 |
| Figura 8. Isotermas de fijación de cloruros que muestran las diferencias de pendientes a concentraciones altas de cloruros libres, adaptado de Tang & Nilsson (1993). | 42 |
| Figura 9. Ensayo de especímenes por succión capilar | 45 |
| Figura 10. Saturación de especímenes con bomba de vacío | 46 |
| Figura 11. Densidad seca de los hormigones endurecidos..... | 52 |
| Figura 12. Densidad aparente de los hormigones endurecidos | 52 |
| Figura 13. Absorción de los hormigones. Porcentaje en relación al peso seco | 53 |
| Figura 14. Volumen de poros de cada tipo de hormigón..... | 54 |
| Figura 15. Incremento de la masa por unidad de área para cada tipo de hormigón, en relación al tiempo total de duración del ensayo..... | 55 |
| Figura 16. Incremento de la masa por unidad de área de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo para las primeras 6 horas del ensayo | 56 |
| Figura 17. Incremento de la masa por unidad de área de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo total del ensayo..... | 57 |
| Figura 18. Pérdida de masa para cada tipo de hormigón, en relación al tiempo total de duración del ensayo | 58 |
| Figura 19. Pérdida de masa de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo para las primeras 6 horas del ensayo..... | 59 |
| Figura 20. Pérdida de masa de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo total del ensayo | 59 |
| Figura 21. Curvas de incremento de masa en relación con el tiempo para el hormigón convencional a distintas humedades relativas | 60 |
| Figura 22. Curvas de incremento de masa en relación con el tiempo para el hormigón B _{DVR} 20 a distintas humedades relativas | 61 |
| Figura 23. Curvas de incremento de masa en relación con el tiempo para el hormigón B _{EMV} 20 a distintas humedades relativas | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 24. Curvas de pérdida de masa en relación con el tiempo para el hormigón convencional a distintas humedades relativas | 62 |
| Figura 25. Curvas de pérdida de masa en relación con el tiempo para el hormigón B _{DVR} 20 a distintas humedades relativas | 63 |
| Figura 26. Curvas de pérdida de masa en relación con el tiempo para el hormigón B _{EMV} 20 a distintas humedades relativas | 64 |
| Figura 27. Forma típica de una isoterma de sorción de tipo II, adaptado de Kielsgaard (1986)..... | 65 |
| Figura 28. Isotermas de sorción del hormigón control con áridos naturales | 66 |
| Figura 29. Isotermas de sorción del hormigón reciclado por el método de reemplazo directo..... | 67 |
| Figura 30. Isotermas de sorción del hormigón reciclado por el método del volumen de mortero equivalente..... | 68 |
| Figura 31. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 0,03125M (izquierda) y en solución de 0,0625M (derecha) | 69 |
| Figura 32. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 0,125M (izquierda) y en solución de 0,25M (derecha)..... | 69 |
| Figura 33. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 0,5M (izquierda) y en solución de 1,0M (derecha)..... | 70 |
| Figura 34. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 2,0M..... | 70 |
| Figura 35. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 0,03125M (izquierda) y en solución de 0,0625M (derecha)..... | 71 |
| Figura 36. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 0,125M (izquierda) y en solución de 0,25M (derecha) | 71 |
| Figura 37. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 0,5M (izquierda) y en solución de 1,0M (derecha) | 72 |
| Figura 38. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 2,0M..... | 72 |
| Figura 39. pH final en las soluciones a distintas molaridades que contienen al hormigón control (izquierda) y la conductividad final de cada una (derecha)..... | 73 |
| Figura 40. pH final en las soluciones a distintas molaridades que contienen al hormigón reciclado DVR (izquierda) y la conductividad final de cada una (derecha) | 73 |
| Figura 41. pH final en las soluciones a distintas molaridades que contienen al hormigón reciclado EMV (izquierda) y la conductividad final de cada una (derecha) | 74 |
| Figura 42. Isotermas de fijación de cloruros del B _{CON} en relación con la concentración inicial de cloruros totales..... | 75 |
| Figura 43. Isotermas de fijación de cloruros del B _{DVR} 20 en relación con la concentración inicial de cloruros totales..... | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 44. Isotermas de fijación de cloruros del B _{EMV20} en relación con la concentración inicial de cloruros totales..... | 76 |
| Figura 45. Capacidad de fijación de los hormigones a diferentes concentraciones de cloruros libres iniciales | 77 |
| Figura 46. Perfiles de penetración de cloruros totales (izquierda) y libres (derecha) del hormigón B _{CON} y las curvas de la ecuación de Fick a los 35 días | 78 |
| Figura 47. Perfiles de penetración de cloruros totales (izquierda) y libres (derecha) del hormigón B _{DVR20} y las curvas de la ecuación de Fick a los 35 días | 79 |
| Figura 48. Perfiles de penetración de cloruros totales (izquierda) y libres (derecha) del hormigón B _{EMV20} y las curvas de la ecuación de Fick a los 35 días | 79 |
| Figura 49. Perfiles de penetración de cloruros de los tres tipos de hormigón a los 35 días de exposición | 80 |
| Figura 50. Concentración de cloruros libres, fijos y totales del hormigón B _{CON} en función a la profundidad..... | 81 |
| Figura 51. Concentración de cloruros libres, fijos y totales del hormigón B _{DVR20} en función a la profundidad..... | 81 |
| Figura 52. Concentración de cloruros libres, fijos y totales del hormigón B _{EMV20} en función a la profundidad..... | 82 |
| Figura 53. Espécimen del hormigón B _{CON} en la evaluación de penetración de cloruros con AgNO ₃ | 82 |
| Figura 54. Espécimen del hormigón B _{DVR20} en la evaluación de penetración de cloruros con AgNO ₃ | 83 |
| Figura 55. Espécimen del hormigón B _{EMV20} en la evaluación de penetración de cloruros con AgNO ₃ | 83 |
| Figura 56. Penetración de cloruros, en milímetros, de los tres tipos de hormigón .. | 84 |

1 INTRODUCCIÓN

La construcción es uno de los sectores más grandes y activos de Europa y el mundo. En el ámbito de la Unión Europea, este es el responsable del 50% de los recursos naturales empleados, el 40% de la energía consumida asociada con la fabricación de materiales y uso, que se traduce en emisiones de CO₂ a la atmósfera, y del 50% de los residuos generados (Anink, Boonstra, & Mak, 1996).

La fase de extracción de materias primas de las canteras y graveras es una de las que tiene un mayor impacto ambiental, considerándose crítico debido a que supone una pérdida irreversible de la calidad ambiental, aunque se hagan rehabilitaciones finales de estos sitios de extracción. Esta fase genera, además del agotamiento de los recursos naturales próximos, como resultado del uso desmedido de los mismos, el incremento de la cantidad de energía requerida para realizar las mismas actividades propias del sector, debido al aumento de la distancia entre los lugares de obtención de materias primas y el de la construcción.

Por otro lado, de acuerdo con la Oficina de Estadística de la Unión Europea situada en Luxemburgo, en el año 2014 se generaron en los 28 estados miembros cerca de 871 millones de toneladas de residuos provenientes de actividades de construcción (obras nuevas y de restauración) y demolición (Eurostat, 2014). Debido a que la naturaleza de estos residuos es cada vez más compleja por la diversificación de los materiales utilizados, además de motivos económicos, falta de sensibilización y adopción de disposiciones legales y administrativas adecuadas, cerca del 55% de estos residuos terminan en vertederos, sin recibir una valorización adecuada. Esta cifra ha venido disminuyendo en el tiempo a partir de la introducción del concepto de desarrollo sostenible en el informe Brundland en 1987, que aboga por un desarrollo que satisfaga las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro, para atender las suyas propias.

Uno de los campos de interés relacionados con la construcción sostenible ha propuesto la implementación de procesos de revalorización de residuos que engloba el reciclaje y la reutilización de los mismos, con la finalidad de sortear el agotamiento de los recursos naturales y evitar la utilización de grandes espacios geográficos para disponer de dichos residuos. En la fabricación del hormigón, una de las materias primas que más atención ha recibido en este aspecto son los áridos ya que su presencia en el mismo oscila entre el 70 y 80% del volumen total y su utilización tiene un alto coste ambiental, por los motivos expuestos anteriormente, además de ser un recurso natural no renovable. Se ha propuesto e implementado en muchos países, por lo tanto,

la utilización de áridos reciclados provenientes de residuos de hormigón en lugar de los extraídos de fuentes naturales.

Uno de los principales inconvenientes que se ha presentado con la utilización de áridos reciclados, es que tienen divergencias con los áridos naturales en algunas propiedades como la porosidad y absorción de agua, que son mayores en los primeros y que pueden tener una influencia importante en la durabilidad de la estructura. Generalmente, para fabricar hormigones con áridos reciclados se han utilizado métodos clásicos de dosificación como el de Fuller, Bolomey o ACI, sin embargo, para obtener comportamientos similares a los hormigones fabricados con áridos naturales en los parámetros anteriormente mencionados, habitualmente se requieren mayores cantidades de cemento. Es ampliamente reconocido que la producción de cemento es una de las actividades que genera mayor cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera, por lo cual, fabricar hormigones con áridos reciclados resuelve algunos problemas de sostenibilidad como la reducción del uso de recursos naturales o la generación de residuos de construcción y demolición, pero agrava otros como el de las emisiones de dióxido de carbono.

Con la finalidad de resolver este problema, se ha desarrollado un método de dosificación para hormigones con áridos reciclados con base en el de la American Concrete Institute, llamado “Volumen de Mortero Equivalente” (Fathifazl, y otros, 2009) que reduce las cantidades de cemento utilizadas ya que considera al mortero adherido en los áridos reciclados como parte del contenido total de mortero requerido en el hormigón por diseño en la mezcla.

Debido a que este método ha sido propuesto recientemente, resulta importante estudiar la durabilidad de los hormigones fabricados con áridos reciclados mediante la comparación entre este y otros métodos clásicos de dosificación frente a mecanismos de deterioro frecuentes como el de penetración de cloruros, además de la susceptibilidad de estos hormigones de transportar líquidos y humedad, que es un factor que gobierna en la vida útil de las estructuras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

La corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón afecta la seguridad y la vida útil de las estructuras y puede generar altos costes por reparación. La utilización de hormigones con áridos reciclados crea un elevado nivel de desconfianza en los aspectos relativos a la durabilidad estructural, por lo cual, entender el ingreso de iones cloruro y transporte de agua en el interior de este tipo de hormigones es importante para realizar mejores predicciones del desempeño de las estructuras en cortos y largos periodos de tiempo. El objetivo principal de este trabajo, por lo tanto, es estudiar estos dos factores en un hormigón convencional y dos tipos de hormigón con áridos reciclados, uno de ellos diseñado con métodos clásicos y el otro con una nueva metodología.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar parámetros relacionados con la estructura porosa de los hormigones elaborados con áridos reciclados diseñados bajo métodos clásicos y el método de volumen de mortero equivalente como lo son la densidad seca, densidad aparente, absorción y volumen de poros y comparar sus valores con los de un hormigón control fabricado con áridos naturales.
- Estudiar los procesos de transporte de agua en el interior del hormigón, a través del incremento de masa debido a succión capilar por unidad de área expuesta, de los hormigones fabricados con áridos reciclados diseñados por métodos clásicos y el método de volumen de mortero equivalente, y comparar sus comportamientos con el de un hormigón control elaborado con áridos naturales.
- Estudiar los procesos de transporte de agua a través de la pérdida de masa por unidad de área debido al secado en condiciones controladas de temperatura y humedad de especímenes saturados de hormigones fabricados con áridos reciclados diseñados por métodos clásicos y el método de volumen de mortero equivalente, y comparar sus comportamientos con el de un hormigón control elaborado con áridos naturales.
- Evaluar el intercambio de agua con el ambiente de los hormigones reciclados y el convencional a través de las isoterms de sorción, que muestran el

contenido de agua de los especímenes, una vez el sistema ha alcanzado el equilibrio, en función a la humedad relativa del ambiente. Además se estudia el incremento o pérdida de masa de los mismos (por captación o liberación de humedad) en función del tiempo.

- Medir la cantidad de cloruros que se fijan en ciertos hidratos del cemento, de los incorporados en el hormigón posteriormente a la hidratación, y determinar la capacidad de fijación de los hormigones fabricados con áridos reciclados y comparar los valores obtenidos con los del hormigón control, así como también cuantificar la cantidad de cloruros que quedan libres en la solución de los poros.
- Determinar la resistencia a la penetración de cloruros por difusión pura de los hormigones reciclados y el convencional a través de la obtención de perfiles de penetración, los coeficientes de difusión y la concentración en la superficie expuesta.

3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1 Durabilidad del hormigón

La durabilidad de una estructura de hormigón armado puede definirse como la capacidad que tiene la misma de soportar durante la vida útil para la que ha sido proyectada las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta y que provocan su degradación, ya que las mismas pueden generar efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural, o bien una disminución de la capacidad resistente de sus materiales. Una estructura durable deberá ser capaz, sometida a factores de degradación, de mantener un desempeño superior al mínimo aceptable establecido por el proyectista, la propiedad o cualquier otro agente involucrado, durante la ejecución y un tiempo de uso determinado. De acuerdo con la Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE-08, la vida útil nominal de una estructura se fija en la fase de proyecto y es función del tipo de estructura y su repercusión económica (EHE, 2008).

La durabilidad del hormigón como material compuesto incluyendo los metales embebidos en él es en general relativamente buena, sin embargo, algunas prácticas constructivas habituales pueden afectar la vida útil de las estructuras provocando que sea más corta de lo previsto en el valor de cálculo. Estas prácticas pueden ser la reducir los costes utilizando dosificaciones inadecuadas o sacrificando la calidad de los materiales, así como también la omisión o mala ejecución de procesos como la compactación o el curado que mitigan los efectos de los mecanismos de deterioro a los que pueden estar expuestas las estructuras.

Existe un gran número de factores que pueden influir en la capacidad del hormigón, para una aplicación específica, de resistir exitosamente los mecanismos de deterioro presentes en el ambiente. Por ejemplo, para resistir los efectos de los ciclos de hielo y deshielo, el hormigón debe tener una cierta cantidad de aire ocluido y una edad suficiente para resistir las tensiones provocadas por el incremento de volumen del agua congelada. Para resistir al ataque sulfático, el hormigón debe tener una permeabilidad baja y ser fabricado con cementos con un contenido reducido de aluminato de calcio que lo hacen resistente a sulfatos. Por otro lado, para evitar la corrosión del acero embebido, el hormigón debe tener espesores de recubrimiento adecuados y una baja permeabilidad (Taylor, y otros, 2013).

Cada mecanismo de deterioro depende de variables diferentes por lo cual, como se verá en los siguientes apartados, la Instrucción Española del Hormigón Estructural establece un modelo de durabilidad para cada proceso de degradación. Por otro lado,

como se deduce de lo puntualizado previamente, casi todos los problemas de durabilidad en el hormigón tienen relación directa con la distribución de tamaño de los poros o lo que es lo mismo, su estructura porosa y el grado de interconexión de dichos poros que les permitirá ser llenados por líquidos o gases, y de las condiciones ambientales a las que está sometida la estructura. Las propiedades de la estructura porosa influyen en la posibilidad de transporte de sustancias agresivas y perjudiciales para el propio hormigón o las armaduras. Las fisuras producto de la retracción o fluencia incrementan también la penetración de agua y otras sustancias, y las mismas, pueden representar una causa o una consecuencia de deterioro. Cuando las sustancias perjudiciales que penetran al hormigón están en forma iónica, el ritmo de penetración depende de las diferencias de concentración de dichas sustancias en la solución porosa entre la superficie y el interior del hormigón. De la misma forma, las diferencias de presión en las distintas partes de su estructura pueden gobernar la penetración de agentes nocivos. Finalmente, las condiciones ambientales determinan el estado límite de durabilidad y la vida útil de la estructura ya que la misma afecta la humedad relativa en el sistema de poros y la velocidad a la que los mecanismos de deterioro atacan al hormigón (Biczók, 1967).

En general, el propósito de un diseño basado en la durabilidad es que cada hormigón se adecúe al ambiente al que estará expuesto y a las propiedades que se desea que tenga el mismo durante su vida útil.

3.1.1 El cemento y las reacciones de hidratación

El hormigón es un material compuesto formado por áridos de diferentes tamaños y una pasta de cemento porosa producto de la reacción del cemento y el agua del amasado (Garcés, Climent, & Zornoza, 2008). Este material ofrece una buena resistencia a los esfuerzos de compresión, sin embargo, no goza de las mismas prestaciones frente a esfuerzos de flexión, tracción y cortante, lo que obliga en un importante número de aplicaciones, a reforzarlo con barras de acero que cumplirían funciones resistentes para aquellos esfuerzos en los que el hormigón por sí solo se desempeña deficientemente. No obstante, el acero embebido es el material generalmente más vulnerable a sufrir los ataques por parte de agentes agresivos que penetran en el hormigón y que repercuten en la durabilidad de la estructura.

El cemento Portland, conglomerante más usado, se compone principalmente de silicatos tricálcico y bicálcico (C_3S y C_2S) cuyos porcentajes en el clínker son 30 – 65% y 10 – 35% respectivamente, aluminato tricálcico C_3A cuya presencia en el clínker oscila entre 8 – 15% y el ferroaluminato tetracálcico C_4AF en un 8 – 10%, además de yeso que ayuda a controlar el fraguado mermando la velocidad de hidratación de los aluminatos, y otros componentes en pequeñas cantidades (Mehta & Monteiro, 2013).

La hidratación de los aluminatos produce reacciones que son las principales responsables del fraguado y que, en presencia de yeso, forman etringita $C_6As_3H_{32}$ -AFt. La hidratación del C_3A y el C_4AF es muy similar, pero para este último ocurre a una velocidad menor y la etringita se forma con hierro incorporado en su estructura. Ante un exceso de C_3A , la etringita formada inicialmente reacciona con dicho componente, originando monosulfoaluminato hidratado. Por otro lado, los silicatos bicálcico y tricálcico son los responsables de las resistencias mecánicas que alcanza el hormigón y su hidratación forma un gel rígido compuesto de partículas de estructura laminar normalmente aglomeradas en formaciones de unas pocas micras de tamaño. Además de este gel, llamado silicato de calcio hidratado (CSH), la hidratación de los silicatos forma cristales hexagonales de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) o Portlandita que es de especial importancia en la dotación de la alcalinidad a la solución de los poros, y con ello, a la protección de los diversos tipos de acero embebidos en el hormigón (Neville A. M., 2011).

La estructura porosa del hormigón está formada por macroporos (de tamaño mayor a 50nm), mesoporos (2 - 50 nm) y poros de gel que son el espacio entre las fibras del silicato de calcio hidratado y que constituyen el 28% del volumen la pasta hidratada. Estos últimos tienen un efecto en la retracción y fluencia del hormigón pero no afectan su durabilidad ya que son muy pequeños y no permiten el transporte de sustancias. Por otra parte, los mesoporos que son principalmente los poros capilares formados por exceso de agua durante el amasado, relaciones agua/cemento altas o por influencia de las propiedades mismas de los materiales. Los macroporos, resultantes del aire atrapado durante el amasado o introducidos intencionalmente a través de ocluidores de aire, si tienen influencia en la durabilidad ya que tienen efectos en la resistencia, permeabilidad y contracción del hormigón, lo cual afectará la protección que este brinda a las armaduras de refuerzo (Montoya, 2000).

3.1.2 Mecanismos de deterioro del hormigón

Los mecanismos de deterioro del hormigón pueden ser clasificados en función a si sus causas son externas o intrínsecas al mismo. Los mecanismos externos de deterioro más habituales son los ciclos de hielo y deshielo, el ingreso de cloruros, la carbonatación, ataques por sulfatos, ataques por ácidos, abrasión/erosión, fuego, impacto y la incidencia de cargas no estimadas en la fase de diseño. Las reacciones álcalis inducidas por algunos áridos en condiciones de humedad elevadas o deterioros debido a la reacción retardada de la etringita son considerados mecanismos de deterioro internos. Por otro lado, estos mecanismos pueden ser divididos en aquellos que generan un deterioro inducido físicamente y aquellos que lo hacen químicamente (Montoya, 2000).

La corrosión de las barras de refuerzo y diversos metales embebidos es la causa principal de deterioro de las estructuras de hormigón armado. Este tipo de deterioro es causado por mecanismos de inducción química como la carbonatación y la penetración de cloruros en el hormigón. En ambos mecanismos, la humedad relativa y la estructura porosa del hormigón, como ya se ha mencionado, juegan un papel fundamental porque tienen efecto en la capacidad de transporte de sustancias en el hormigón. La presencia de agua y oxígeno son condiciones necesarias para que haya corrosión. En un ambiente seco no existirá corrosión o el proceso de iniciación de la misma será muy lento por la ausencia de agua, que es la principal responsable de transportar los agentes nocivos al interior del hormigón. De igual forma ocurre cuando hay humedades relativas muy altas (como en estructuras sumergidas) debido a que hay una escasa difusión de oxígeno, y a que se dificulta el flujo de agua dentro del hormigón producto de la saturación de sus poros.

3.1.2.1 Carbonatación

La carbonatación es la pérdida de alcalinidad de la solución de los poros producto de la disolución del dióxido de carbono que se encuentra en el aire en pequeñas cantidades (0,03% en áreas rurales hasta 0,3% en grandes ciudades), en el agua presente en los poros del hormigón. El CO_2 reacciona con el hidróxido de calcio, situado en el agua de los poros y encargado de darle a la misma, valores de pH en un rango entre 12 y 13,5. El carbonato de calcio (CaCO_3), o bien sus formas cristalinas aragonita o vaterita, son unos de los principales productos de esta reacción y los responsables de la disminución de la alcalinidad del agua en los poros, lo que provocará que se inestabilice la capa pasivante, que es una disolución sólida de Fe_3O_4 y Fe_2O_3 cuyo espesor oscila entre 10^{-3} y 10^{-1} μm en la superficie del acero de refuerzo y que lo protege de las reacciones que tendría su contacto con el oxígeno y el agua. La corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón en los casos de carbonatación es de tipo uniforme o generalizada (Garcés, Climent, & Zornoza, 2008).

Puesto que en la carbonatación se precipita el carbonato de calcio en los poros y además la reacción libera agua que continúa provocando reacciones de hidratación del cemento, esta no generará cambios importantes en la permeabilidad y resistencia del hormigón (Hansson, 2007). Además, el ritmo de carbonatación es mínimo y no representa un problema para la durabilidad si la estructura se encuentra ubicada en ambientes secos o con humedades relativas muy altas, sin embargo, en ambientes con humedades relativas entre el 50% y 70% este ritmo se incrementa significativamente, por lo cual, la carbonatación del hormigón de recubrimiento podría significar un importante mecanismo de deterioro y de disminución de la vida útil de la estructura (Tuutti, 1982). Por lo general, la velocidad de avance de la capa carbonatada se verá disminuida con el paso del tiempo, y puede ser modelizada según la Instrucción

Española del Hormigón Estructural, por la segunda ley de Fick de acuerdo con la expresión:

$$d = K \sqrt{t} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde d es la profundidad de la capa carbonatada a una edad t , y K es el coeficiente de carbonatación, un valor utilizado para calcular dicha profundidad desde la superficie en el tiempo. Esta expresión es válida únicamente en condiciones estables.

El coeficiente de carbonatación es una constante compleja que depende de las características del material y las condiciones ambientales, como por ejemplo la permeabilidad del hormigón, su resistencia mecánica, el tipo de conglomerante, el tiempo de curado, el grado de saturación de los poros relacionado con la humedad relativa del ambiente, la temperatura, entre otras (Smolczyk, 1976).

3.1.2.2 Penetración de cloruros

Cuando no hay presencia de cloruros en la solución de los poros, la corrosión de las armaduras puede iniciarse cuando la capa carbonatada del recubrimiento alcanza las armaduras y destruye la capa pasivante. Por otro lado, si en la solución de los poros a una profundidad desde la superficie del hormigón igual al espesor de recubrimiento, hay un contenido de cloruros superior a cierto valor crítico (valor umbral de concentración de cloruros) y la presencia de oxígeno en la superficie del acero de refuerzo, la capa pasivante podrá ser destruida de una forma localizada conocida como “picadura” e iniciarse la corrosión. El ataque por cloruros es uno de los mecanismos principales de deterioro por corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón. Los cloruros pueden penetrar el hormigón a través de procesos de difusión o de transporte capilar cuando este está en contacto con sales de deshielo o en un ambiente marino. Además, pueden estar presentes en el hormigón fresco, es decir, haber sido introducidos con alguno de los componentes durante el amasado, que pueden ser los áridos, el agua del amasado, algún aditivo o sales depositadas en el acero de refuerzo, entre otros (Thuresson, 1996). Estos se encuentran en la pasta de cemento hidratada bajo distintas formas: libres (disueltos en la solución intersticial) y fijos (debido a reacción química con compuestos del cemento o por adsorción físico-química al gel de CSH). Sólo los cloruros libres son efectivos en iniciar la corrosión.

El valor umbral de concentración de cloruros es dependiente de la relación Cl^-/OH^- . Como se mencionó, los iones OH^- en la solución de los poros tienen un efecto estabilizador del pH y le aportan basicidad, por lo cual, utilizar conglomerantes que aporten una concentración alta de OH^- puede incrementar el valor de concentración de cloruros necesario para iniciar la corrosión del acero. Una vez alcanzados los valores necesarios, los cloruros forman FeCl_2 que produce una acidificación local, la

destrucción de la capa pasivante y el inicio de la corrosión (Garcés, Climent, & Zornoza, 2008).

En los hormigones saturados el mecanismo principal de transporte de cloruros es la difusión, cuyos modelos aplican a hormigones sumergidos y sin movimiento de agua, que ocurre debido a diferencias en la concentración de iones en la solución en los poros. Por otra parte, el movimiento de agua en el interior del hormigón permite el desplazamiento de los cloruros y ocurre cuando el mismo está expuesto a ciclos de humidificación y secado. En general, las variables más importantes en el ataque por cloruros son su concentración en la superficie del hormigón, el valor umbral de concentración de cloruros (chloride threshold value) a partir del cual se inicia la corrosión y el ritmo de transporte de los iones cloruro a través del hormigón de recubrimiento (Hansson, 2007). El ritmo de penetración de cloruros, al igual que el de carbonatación, puede ser igualmente modelizado por la segunda ley de Fick donde K es el coeficiente de penetración de cloruros. Por otra parte, despejando t de la Ecuación 1 se puede calcular el tiempo necesario para que se produzca una concentración crítica de cloruros a una distancia d respecto a la superficie del hormigón como se muestra en la siguiente expresión:

$$t = \left(\frac{d}{K_{cl}}\right)^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

d = es la profundidad desde la superficie, en mm,

t = es el tiempo en años, y

K_{cl} = es el coeficiente de penetración de cloruros, dado por la siguiente expresión:

$$K_{cl} = \alpha \sqrt{12D(t)} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}}\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

α = factor de conversión de unidades que vale 56157,

C_{th} = concentración crítica de cloruros, en % de peso de cemento,

C_s = concentración de cloruros en la superficie del hormigón, en % de peso de cemento,

C_b = contenido de cloruros aportado por las materias primas en el momento del amasado,

$D(t)$ = coeficiente de difusión efectivo de cloruros para la edad t , en cm^2/s , dado por la expresión:

$$D_{(t)} = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

$D(t_0)$ = coeficiente de difusión de cloruros en el tiempo inicial t_0 y n es el factor de edad que puede considerarse 0,5 si no se obtienen valores específicos basados en ensayos al hormigón (EHE, 2008).

3.1.3 Consideraciones y estrategias de durabilidad

Una vez determinados los diversos mecanismos de deterioro presentes, especialmente aquel que se crea predominante, se podrán definir estrategias de durabilidad que ayuden a mejorar las propiedades del material y a reducir los efectos de la degradación. Para degradaciones químicas, como el de la corrosión de las armaduras, la Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE-08 en el capítulo VII recoge algunas de estas estrategias en la fase de proyecto y de ejecución que tienen consecuencias sobre las variables que afectan los ritmos de carbonatación y de penetración de cloruros. Además plantea recomendaciones para el espesor de recubrimiento, que es la distancia entre la superficie del hormigón y la superficie de la armadura incluyendo cercos y estribos que deberán recorrer los cloruros o la capa de carbonatación antes de iniciar las reacciones de disolución de la capa pasivante y la corrosión. Un incremento en el espesor de recubrimiento incrementará de forma efectiva la vida útil de la estructura.

En el apartado 37.2.4 de la EHE-08 (2008) se establecen los recubrimientos nominales en función a la clase de exposición, tipo de cemento, resistencia característica del hormigón, vida útil de proyecto y nivel de control de ejecución, y condiciones para los recubrimientos de armaduras pasivas y activas pretesas.

Las estrategias de durabilidad concernientes a las fisuras consisten en el limitar el ancho de las mismas según la tabla 5.1.1.2 de la misma Instrucción en función a la clase de exposición y el tipo de hormigón.

La calidad del hormigón como material compuesto y la de los materiales que lo componen considerados individualmente, deben estar incluidas de forma imperativa en las estrategias de durabilidad de la estructura. De acuerdo con la Instrucción EHE-08, un hormigón de calidad adecuada deberá cumplir las siguientes condiciones:

- Selección de materias primas (cemento, agua, áridos, aditivos, adiciones y armaduras) acorde a lo indicado en el capítulo VI. En el Anejo 15 se engloban las propiedades tecnológicas de los materiales para el caso de utilización de áridos reciclados que se abordarán en el capítulo 3.4 de este documento.
- Dosificación adecuada, cumpliendo como requisitos generales un contenido mínimo de cemento y una relación máxima agua/cemento en función a la clase de exposición y tipo de hormigón según la tabla 37.3.2.a. La velocidad de transporte de agentes nocivos puede ser disminuida logrando un hormigón menos permeable utilizando relaciones agua/cemento bajas y un proceso de curado más prolongado para que se produzcan procesos de hidratación de los silicatos y los aluminatos más completos (Dobrowolski, 1998).
- Puesta en obra correcta según lo indicado en el apartado 71.6.
- Resistencia acorde con el comportamiento estructural esperado y congruente con los requisitos de durabilidad, que se definirán en fase de diseño.

Para el caso de hormigones fabricados con áridos reciclados, la Instrucción reúne algunas recomendaciones adicionales debido a la divergencia que presentan dichos áridos en sus propiedades con los naturales, así como la de los hormigones que se fabrican con uno u otro tipo de árido, como se verá en el capítulo 3.4. El Anejo 15 aborda sólo los hormigones con árido reciclado grueso (con un tamaño mínimo de 4 milímetros) procedente de residuos de hormigón que no haya presentado patologías y que no tenga propiedades especiales. En él, se recomienda limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso, estableciendo así, a lo largo de todo el documento, consideraciones diferentes entre los hormigones cuyo contenido de áridos reciclados están por debajo de dicho límite y los que están por arriba. Esto obedece al hecho de que las propiedades de los hormigones reciclados que respetan dicho límite apenas se ven afectadas respecto a aquellos fabricados con áridos naturales. Respecto a los parámetros concernientes a la durabilidad del hormigón la Instrucción establece las siguientes consideraciones:

- En hormigones cuyo contenido de árido reciclado no supere el 20% se podrán mantener los espesores de recubrimiento establecidos en el apartado 37.2.4 e incluso en aquellos con contenidos mayores, siempre que se compense el aumento de la porosidad del hormigón reciclado con un ajuste pertinente de la dosificación y que el ambiente en el que se encuentre la estructura no sea agresivo. El ajuste de la dosificación puede incluir el incremento en el contenido de cemento y/o una disminución en la relación agua cemento.
- El ajuste de contenido mínimo de cemento y la relación A/C deben realizarse de modo que se cumplan, para todas las clases de exposición a partir de la IIIa, los requisitos referentes al ensayo de penetración de agua establecidos en el apartado 37.3.3.

- Controlar siempre la procedencia del hormigón del cual se están obteniendo los áridos, en especial cuando la nueva estructura pueda verse sometida a ciclos de hielo y deshielo, ataque por sulfatos o ambientes marinos. En estos últimos, por ejemplo, los áridos deben ser procedentes de hormigones fabricados con cementos resistentes al agua de mar.
- Control de la durabilidad a través de ensayos al hormigón reciclado.

3.2 Corrosión del acero

Los metales presentes en la corteza terrestre, generalmente minerales como los carbonatos, sulfatos y óxidos, se encuentran en un estado de equilibrio o en su estado de menor energía. Una vez extraídos y a través de un proceso de reducción se obtienen como elementos, rompiendo ese equilibrio y pasando a un estado termodinámicamente metaestable, lo que provoca que bajo casi cualquier condición ambiental, el metal tenga la tendencia a volver a su estado original a través de la oxidación o corrosión.

La estabilidad de un metal está generalmente descrita en términos de potencial de electrodo que es su capacidad de dar o recibir electrones. Los potenciales dependen del pH del ambiente y otros factores como la disponibilidad de oxígeno. El potencial del electrodo está definido como la diferencia de potencial entre un electrodo del metal de interés y un electrodo de referencia que es el SHE “standard hydrogen electrode” de potencial electroquímico 0.00 V (Revie & Uhlig, 2008). Ambos están sumergidos en una sustancia que contiene iones libres (electrolito). Los metales con potenciales de electrodo más positivos son menos propensos a oxidarse (más nobles) mientras que aquellos con potencial más negativo son los que más tienden a hacerlo (más activos). La serie electroquímica ordena estos metales de acuerdo a su potencial de electrodo o lo que es lo mismo, su tendencia a oxidarse.

Los diagramas de Pourbaix (Figura 1) establecen para cada elemento una relación entre el pH y su potencial de electrodo, indicando las regiones en las cuales el metal sería inmune a la corrosión, sufriría un proceso de corrosión activa, o formaría la capa pasivante (Pourbaix, 1974).

La corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón es un proceso electroquímico en el cual se forma, en la misma barra, una pila de corrosión con una zona más noble en la serie electroquímica (catódica) en la cual se da un proceso de reducción y otra más activa (anódica) donde se produce la oxidación. La solución de los poros actúa como electrolito en dicho proceso. En el ánodo, los iones positivos Fe^{+2} están disueltos en la solución de los poros y los electrones se mueven hacia el cátodo a través de la barra. En el cátodo, los electrones ($4e^-$), el oxígeno (O_2) y el agua ($2H_2O$) reaccionan para formar iones OH^- los cuales se mueven hacia el ánodo a

través de la solución de los poros y reaccionan con iones de hierro formando productos de corrosión como el $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 . La formación de uno u otro dependerá del pH del hormigón y los iones agresivos presentes.

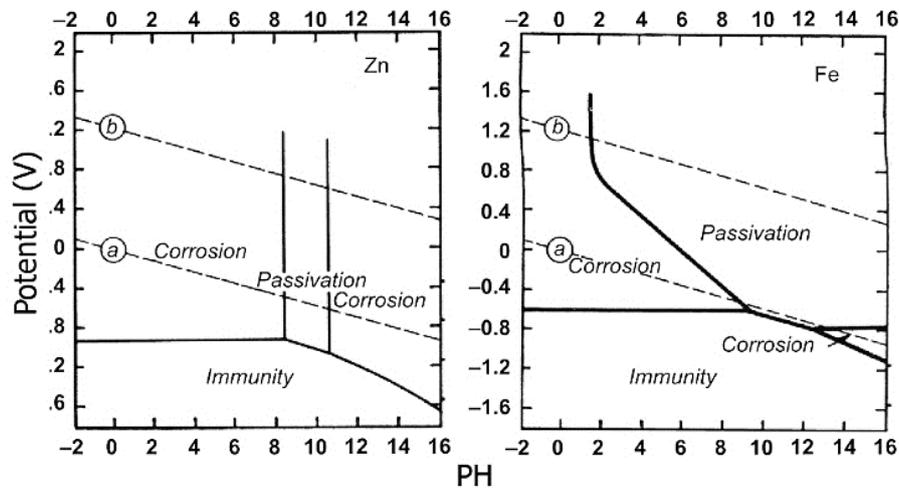
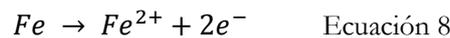
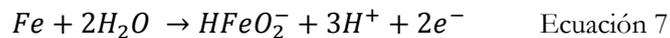
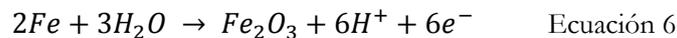
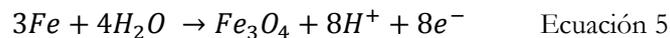
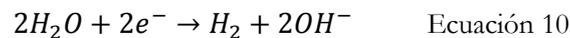
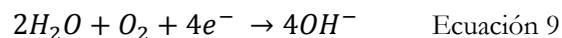


Figura 1. Diagramas de Pourbaix para el Zinc y el Hierro con regiones de inmunidad, corrosión y pasivación (Pourbaix, 1974)

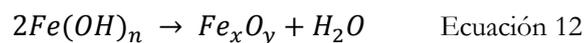
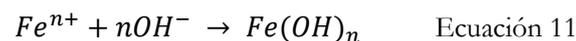
Las posibles reacciones anódicas en el acero de refuerzo son (Hansson, 1984; Ahmed, 2003):



Por otra parte, las reacciones catódicas dependen de la disponibilidad de oxígeno y el pH cerca de la superficie del acero, siendo las más probables las siguientes:



Luego se producen, como se mencionó, reacciones secundarias con iones de hierro formando productos de corrosión en la superficie del metal:



Como se muestra en la Figura 2, el volumen de material sólido no coherente de estos productos de corrosión podría incrementar, por ejemplo, en un factor de 4 respecto al volumen de acero original para el caso de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y más de 6 para el Fe_2O_3 , lo cual traerá como consecuencia la aparición de tensiones de tracción alrededor de las barras de refuerzo que darán origen a fisuraciones y proyecciones del recubrimiento

(Poursaee, 2016), pero además una disminución de la sección transversal de acero efectiva, lo que afecta el límite elástico y la resistencia máxima a tracción del acero provocando la pérdida de ductilidad en la estructura y su capacidad de carga (Fontana, 1986).

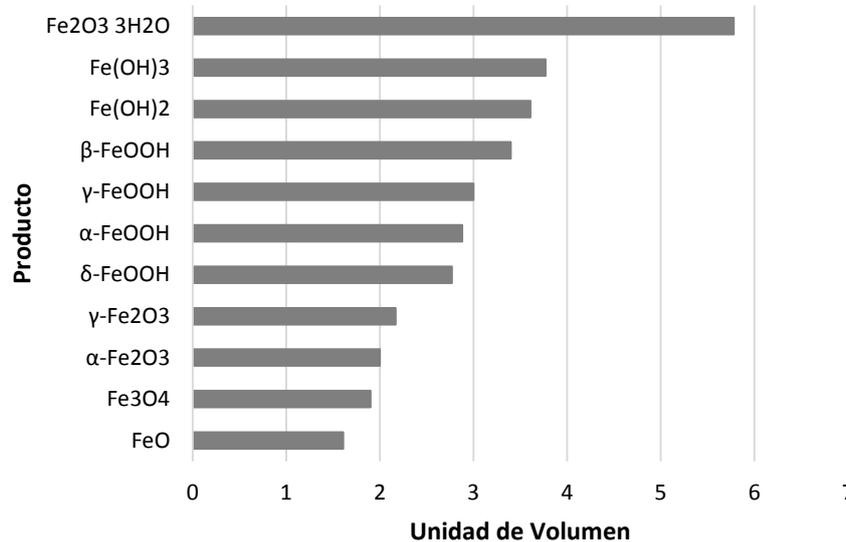


Figura 2. Volumen de los productos de corrosión con respecto al hierro, adaptado de Poursaee (2016)

3.3 Vida útil de una estructura

El diseño explícito de la durabilidad de una estructura de hormigón armado está basado en los principios del desempeño y de vida útil. El principio del desempeño cubre hipótesis relacionadas con las solicitaciones que recibe la misma durante la vida útil y su capacidad de presentar una resistencia superior a dichas solicitaciones manteniendo su forma original y funcionalidad. El otro principio moldea el concepto de vida útil como el período de tiempo, en años, durante el cual la estructura deberá mantener un desempeño adecuado o mínimamente aceptable, y que dicho período sea mayor al mínimo establecido en el proyecto. La Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE-08, sugiere realizar la comprobación del Estado Límite de durabilidad bajo un procedimiento de carácter semiprobabilista, estableciendo que el valor estimado de vida útil de una estructura debe cumplir el principio de vida útil, es decir, ser mayor que el valor de cálculo. Por lo tanto, debe satisfacerse la condición:

$$t_L > t_d \quad \text{Ecuación 13}$$

donde t_L es el valor estimado de vida útil y t_d es el valor de cálculo de la vida útil que se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$t_d = \gamma_t t_g \quad \text{Ecuación 14}$$

γ_t es un coeficiente de seguridad de vida útil, para el cual se adopta un valor de 1,10 y t_g es la vida útil nominal de proyecto escogida según la tabla 5.1 de la Instrucción que indica que la misma no podrá ser inferior a 50 años en el caso de viviendas y oficinas, entre 15 y 50 años en edificios agrícolas e industriales, de 3 a 10 años en estructuras temporales y 100 años en edificios de carácter monumental o de importancia especial, puentes y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta.

El estado límite de durabilidad, o bien el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de cálculo, atiende a un proceso de degradación del hormigón y las armaduras producto de las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta la estructura que impedirán que la misma cumpla los requerimientos para los que ha sido proyectada. El límite crítico en el desempeño de la estructura, que marcará el fin de la vida útil o bien la necesidad de intervenciones de rehabilitación, está definido en función a diversas consideraciones que abarcan desde criterios técnicos, hasta aquellos de carácter estético.

Con respecto a criterios técnicos, el límite crítico podría ser considerado como la ocurrencia de alguno de los siguientes eventos:

- El punto de iniciación de la corrosión (final de la etapa de iniciación).
- Fisuración, rotura y proyección de fragmentos del recubrimiento.
- La reducción de la capacidad resistente de la estructura, debido a la pérdida de sección efectiva de acero, que impida hacer frente a las cargas actuantes y ponga en riesgo la seguridad (Fidjestøl & Tuutti, 1995).

Por otro lado, la aparición de los productos de la corrosión en la superficie del hormigón es frecuentemente indeseable y representa un problema estético que puede establecer un cambio en el límite crítico de desempeño de la estructura.

De acuerdo con la Asociación de Cemento Portland, la corrosión del acero de refuerzo y otros metales embebidos en el hormigón es la causa principal de su deterioro (PCA, 2002). En el Anejo 9 de la Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE-08 se establece entonces, un método probabilístico de cálculo relativo al estado límite de durabilidad con el cual se puede estimar el tiempo de vida útil de una estructura y determinar si alcanza el valor de cálculo de vida útil bajo determinadas clases de exposición ambiental. En este método, se recogen modelos de durabilidad para la estimación de los dos mecanismos principales de deterioro relacionados con la corrosión de las armaduras que ya se han mencionado anteriormente, el de carbonatación y el de penetración de cloruros. Para ambos procesos de corrosión, el tiempo total para que la degradación sea significativa se expresa como:

$$t_L = t_i + t_p \quad \text{Ecuación 15}$$

donde t_i es el tiempo de iniciación, que es el período de tiempo que tarda el agente agresivo en alcanzar el acero de refuerzo, destruir la capa pasivante e iniciar la corrosión y t_p es el tiempo de propagación, que es el tiempo de expansión de la corrosión hasta que se produzca una degradación significativa del elemento estructural. El valor de t_i se calcula con la Ecuación 2 mientras que el valor de t_p se calcula con la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{80}{\emptyset} \frac{d}{v_{corr}} \quad \text{Ecuación 16}$$

donde:

\emptyset = es el diámetro de la armadura, en mm,

d = es el espesor de recubrimiento, en mm, y

v_{corr} = es la velocidad de corrosión, en $\mu\text{m}/\text{año}$ (EHE, 2008).

Es una práctica muy común que en estos modelos de durabilidad la vida útil de las estructuras de hormigón armado sea subdividida en fase de iniciación y fase de propagación, basándose por tanto en el modelo presentado por Tuutti en 1982 (Somerville, 1986). Ambos procesos de corrosión tratados en la Instrucción se componen de esas dos etapas.

Esta estimación de la vida útil de servicio está basada en una combinación de métodos determinísticos y estocásticos que engloban el diseño explícito. En los primeros se utilizan valores medios o característicos de los parámetros que intervienen, ya que tanto los concernientes a la resistencia del hormigón y las armaduras, como a la sollicitación y a la vida útil real (t_L), son tratados como valores determinados que no presentan dispersión (Karlsson & Poulsen, 1995). Por otro lado, los métodos estocásticos o probabilistas introducen para los principios del diseño basado en la durabilidad conceptos como la distribución normal para las acciones agresivas y para las resistencias de los materiales a esas acciones de degradación, tal como se hace en los principios clásicos de la seguridad en el proyecto de estructuras (Helene, 1997). En estos métodos, la sollicitación, la resistencia y la vida útil real son tratados como valores que presentan una dispersión conocida. El diseño se realiza teniendo en cuenta un valor máximo de probabilidad de fallo.

El diseño explícito a través de modelos de previsión de resistencia a la penetración de cloruros y la carbonatación pretende compensar el hecho de que las normas no siempre consideran condiciones de contorno adaptadas a la realidad o bien, que no consideran los últimos desarrollos en tema de materiales. El grado de incertidumbre

de los parámetros concernientes al hormigón, sus armaduras o las condiciones ambientales, requiere de un diseño explícito que involucre ensayos frente a condiciones reales de exposición y uso.

Establecer para la vida útil de la estructura el período de tiempo que dura la etapa de iniciación, es una consideración que está del lado de la seguridad, sin embargo, la estructura puede comportarse adecuadamente por muchos más años a partir del inicio de la propagación y satisfacer otros criterios técnicos, por lo cual esta etapa podría incluirse en la vida útil (Maage, Poulsen, Vennesland, & Carlsen, 1995). Por otra parte, los costes de rehabilitación de una estructura durante la fase de iniciación son generalmente menores que aquellos que tendrían lugar en fase de propagación, por lo cual, es otro criterio que se puede tener en cuenta a la hora de establecer un límite crítico (de Sitter, 1984). Los requerimientos para una estructura en particular sólo pueden ser entonces definidos de acuerdo a los criterios que considere el agente que tendrá la decisión final. Si este no quiere que ocurra corrosión de ningún tipo en la estructura, entonces deberá escoger como requerimiento de vida útil el final de la etapa de iniciación para cualquier zona de la misma, si por el contrario, admite algún grado de corrosión, deberá indicar el porcentaje de avance que se puede aceptar en función a los efectos de la degradación que se quieren evitar. Por lo cual, la forma más conveniente de definir vida útil es el tiempo que transcurre hasta que cierta fracción de las armaduras (si se acepta alguna), para cualquier zona de la estructura, ha empezado a corroerse (Karlsson & Poulsen, 1995).

La penetración de cloruros es el resultado de procesos de difusión y fijación de iones. Los procesos de difusión combinados son cuantificados en términos de perfiles de penetración de cloruros que muestran, en un tiempo determinado, la concentración de los mismos a diferentes profundidades desde la superficie del hormigón. A una profundidad igual a la de recubrimiento, el valor de concentración de cloruros mostrados en los perfiles a diferentes tiempos t , ayudará a determinar el coeficiente de difusión efectivo de cloruros e indicará cuando se producirá la concentración crítica (chloride threshold value) necesaria para que se inicie la corrosión. Por lo cual, este valor de concentración crítica es un parámetro de igual importancia que el del ritmo de penetración de cloruros en la determinación de la vida útil, por tanto, una comparación de la durabilidad de diferentes hormigones no puede ser planteada únicamente en términos de comparación de perfiles de penetración de cloruros, sino que requiere además la evaluación de los procesos de transporte de cloruros en el hormigón y las condiciones necesarias para el inicio de la corrosión (Fidjestøl & Tuutti, 1995).

A través de estos métodos por lo tanto, se podrá determinar el valor estimado de vida útil de la estructura que dependerá, como ya se ha mencionado, de parámetros concernientes a los materiales componentes del hormigón, en especial el cemento y los áridos, la geometría estructural, diseños y métodos de dosificación, y condiciones

ambientales. Luego se podrá comparar y conocer si este se mantiene por encima del valor de cálculo y cumple los requerimientos de proyecto en función a criterios establecidos.

3.4 Áridos reciclados

Tanto el hormigón con áridos naturales como el reciclado son elaborados en general con los mismos materiales, agua, cemento como conglomerante que a su vez puede contener adiciones activas, aditivos y áridos, siendo estos últimos los que establecen, como es de esperarse, la diferencia entre un hormigón y otro. Éstos representan, en volumen, habitualmente entre el 70 y 80 por ciento de los componentes del hormigón, por lo cual, las propiedades del mismo son dependientes directamente de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los áridos que lo componen (Omary, Ghorbel, & Wardeh, 2016). Actualmente la mayoría de las investigaciones se centran en la influencia que tiene sustituir parcialmente o totalmente los áridos naturales por los reciclados en las características y propiedades de los hormigones. Las propiedades de los áridos reciclados presentan un alto grado de heterogeneidad, cuyas variaciones responden principalmente a la naturaleza, procedencia y producción de los mismos, los cuales pueden ser de material cerámico, hormigón, vidrio o plástico, entre otros (Poon, Kou, & Lam, 2007).

En materia de durabilidad, un estudio llevado a cabo en 2012 subraya algunas características de los hormigones fabricados con áridos provenientes de vidrio (finos y gruesos de 20% en peso del contenido total de áridos), entre ellas, una menor densidad y unos porcentajes similares de absorción de agua por capilaridad en comparación con un hormigón control con áridos naturales e igualmente para el caso de absorción de agua por inmersión, aunque se observa una tendencia a incrementar a medida se aumenta el porcentaje de árido reemplazado (de Castro, 2012).

En el caso de la resistencia a la penetración de cloruros, el hormigón con áridos de vidrio muestra una ligera propensión a ser penetrado más fácilmente por cloruros que el hormigón de referencia. Los hormigones fabricados con este tipo de áridos tienen una interfase árido-pasta más débil y una disminución importante en la trabajabilidad, por lo cual se requieren relaciones A/C mayores, sin embargo, estos áridos tienen una menor capacidad de absorción y menor densidad que los naturales. Esta propiedad de la interfase no la comparten, por ejemplo, los hormigones con áridos reciclados provenientes de residuos de hormigón ya que estos tienen mortero adherido que, debido a su porosidad, absorción de agua y rugosidad crea una interfase adicional más fuerte con la nueva pasta de cemento (de Brito, Ferreira, Pacheco, Soares, & Guerreiro, 2016). En la Figura 3 se muestra la diferencia en la interfase árido-pasta entre los hormigones con áridos naturales y reciclados provenientes de residuos de

hormigón. El mortero adherido puede presentar diferencias significativas con el mortero nuevo.

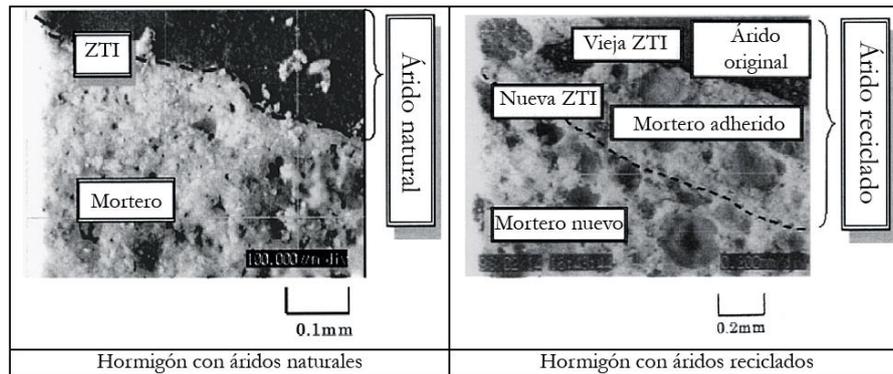


Figura 3. Comparación de las zonas de transición interfase (ZTI) de áridos naturales y reciclados, traducido de Otsuki, Miyazato & Yodsudjai (2003)

Otra investigación llevada a cabo con hormigones fabricados con áridos de plástico reciclado (polietileno de baja y alta densidad) determinó que todos los hormigones que contenían áridos poliméricos produjeron valores más altos de absorción de agua (Albano, Camacho, Hernandez, Matheus, & Gutierrez, 2009). El coeficiente de sorptividad aumentó luego de reemplazar los áridos naturales por áridos de tereftalato de polietileno. Además, a medida se incrementaba el porcentaje de árido reemplazado, los especímenes mostraban un incremento en la absorción de agua. Respecto a la resistencia a la penetración de cloruros y profundidad de carbonatación, un estudio realizado con hormigones fabricados con áridos de tereftalato de polietileno determinó que existe una menor resistencia a la penetración de cloruros y mayores profundidades de carbonatación en hormigones fabricados con este tipo de árido en comparación con aquellos fabricados con áridos naturales (Kou, Lee, Poon, & Lai, 2009).

Por lo tanto, debido a las diferencias en las propiedades físicas y, por consiguiente, de durabilidad que aportan al hormigón uno u otro árido reciclado en función a su naturaleza, resulta conveniente categorizarlos de modo de obtener una clasificación de acuerdo a su composición para evaluar objetivamente su influencia en dichas propiedades.

Se sabe que los áridos provenientes de residuos de hormigón, con respecto a aquellos provenientes de otras fuentes, gozan de mejores propiedades en general por contener menos materiales indeseados (Jimenez, 2015), motivo por el cual, la Instrucción EHE-08 sólo recomienda este tipo de áridos para su utilización en hormigones con funciones estructurales. Este tipo de árido, es producto de la trituración del hormigón objeto de demolición, formado principalmente por áridos naturales con mortero adherido a ellos que contiene tanto productos de la hidratación como partículas de cemento no hidratadas. Mientras mayor sea la cantidad de mortero adherido en el

árido, mayores serán las diferencias en las propiedades físicas del hormigón con respecto a uno fabricado con áridos naturales. La densidad, porosidad, absorción, granulometría y forma de las partículas son las propiedades que más se ven afectadas.

Las densidades de los áridos reciclados son en general menores que los de los áridos naturales debido a las impurezas que contienen y a la densidad del mortero adherido que es menor que la del árido en sí mismo, por lo cual, la Instrucción EHE-08 señala que la densidad del hormigón, y por consiguiente los valores característicos de las acciones permanentes de la estructura, se ven afectados por la cantidad de árido reciclado utilizado, disminuyendo la densidad a medida se aumenta su porcentaje.

La densidad del árido reciclado por lo general oscila entre 2100 y 2400 kg/m³ por lo cual se considera a estos áridos de densidad normal y no como ligeros (Sánchez & Alaejos, 2004), razón por la cual la Instrucción EHE-08 indica que la disminución en la densidad de los hormigones con un porcentaje de reemplazo de áridos naturales por reciclados inferior al 20%, es prácticamente imperceptible.

Debido al mortero adherido, la porosidad de los áridos reciclados puede ser entre 2 y 5 veces mayor que la del árido natural (Barra, 1996; Corinaldesi, 2010). La absorción tanto por inmersión como por succión capilar es una de las propiedades que más difiere cuando se comparan los áridos reciclados con los naturales. En la mayoría de los casos la absorción de los áridos reciclados suele ser mayor que la de los naturales debido al mortero adherido a ellos, contribuyendo a la permeabilidad total del hormigón. Una comparación de resultados de varios estudios muestra una relación entre el proceso de trituración y el tamaño de los áridos (que repercuten en la cantidad de mortero adherido) y la absorción del hormigón (Malešev, Radonjanin, & Marinković, 2010; Matias, de Brito, Rosa, & Pedro, 2014; Gonçalves, Esteves, & Vieira, 2004; de Brito, Ferreira, Pacheco, Soares, & Guerreiro, 2016). Otros estudios han demostrado además, que la absorción del árido tiene una relación directa con la relación A/C del hormigón al que pertenecían, siendo menor en aquellos con relaciones A/C bajas (Angulo & Mueller, 2009).

La granulometría y la forma de las partículas de los áridos reciclados están ligados al proceso de producción y trituración de los mismos, aunque dichos procesos se realizan para que estos parámetros no difieran mucho de los naturales y cumplan los requerimientos para la fabricación de hormigón (Jimenez, 2015).

Las propiedades químicas de los áridos reciclados pueden verse afectadas en función al tipo de ambiente al que estuvo expuesta la estructura a la que pertenecían. Los áridos pueden contener impurezas orgánicas, cloruros (que normalmente están presentes en residuos de estructuras ubicadas en ambientes marinos o con ciclos de hielo y deshielo), y sulfuros o sulfatos que pueden reaccionar expansivamente con componentes del cemento y agua. Todas estas situaciones pueden afectar las

propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón al que le serán introducidos estos áridos (Martín-Morales, Zamorano, Ruiz-Moyano, & Valverde-Espinosa, 2011).

3.4.1 Diseños de mezcla en hormigones con áridos reciclados

El procedimiento de diseño de mezcla del hormigón con áridos reciclados más extendido tiene sus bases en los métodos clásicos existentes, entre ellos el de Fuller, Bolomey o el de la ACI (American Concrete Institute). Este consiste en la realización de un diseño de mezcla para hormigón con áridos naturales y luego un reemplazo directo de un determinado porcentaje de estos por áridos reciclados, tomando en consideración las características que estos confieren a la mezcla y realizando los ajustes que le permitan al hormigón tener, tanto en estado fresco como endurecido, propiedades similares a las de uno con áridos naturales. Estos ajustes comúnmente comprenden modificaciones en la relación A/C e incrementos en el contenido de cemento, como indica la Instrucción EHE-08 para casos en el que reemplazo de árido natural por el reciclado sea mayor a 20% y la norma ACI (ACI Committee 555, 2001).

El problema principal de este procedimiento es que no considera al árido reciclado como un material constituido por dos fases, árido natural y el mortero adherido, por lo cual, excluye a este último como parte constituyente del mortero del nuevo hormigón. Un cambio de filosofía en este sentido, permitiría reducir el contenido de cemento en la mezcla consiguiendo hormigones más eficientes económicamente y ambientalmente, además de mitigar efectos indeseados como el de la retracción. Fathifazl et al. (2009) propuso un método llamado “Volumen de Mortero Equivalente” o EMV por sus siglas en inglés, que considera y calcula el mortero adherido en los áridos reciclados, y lo incluye en la cantidad total de mortero necesario en la mezcla, reduciendo de esta forma el consumo de cemento, agua y árido fino, aunque en ocasiones es necesario ajustar el diseño de la mezcla para garantizar una adecuada trabajabilidad.

Aun haciendo ajustes en la mezcla, una de las variables que provoca mayor diferencia en las propiedades del hormigón con áridos reciclados respecto al fabricado con áridos naturales es el porcentaje de árido que se reemplaza. Andal et al. (2016) llevó a cabo un estudio de la trabajabilidad de seis hormigones con áridos reciclados, provenientes de residuos de hormigón de elevada calidad, a través de ensayos de asentamiento de acuerdo con la norma ASTM C143, tomando medidas en intervalos de 15 minutos con la intención de examinar las variaciones del asentamiento durante un tiempo total de 45 minutos. Los diseños de mezcla incluían la misma relación agua/conglomerante (cemento + escorias) para todos los hormigones y diferentes porcentajes de reemplazo de árido natural por reciclado. Los resultados indican que, aunque el asentamiento inicial es similar para todas las muestras (debido a que los diseños de mezcla fueron ajustados para cada uno), en hormigones con mayores

porcentajes de reemplazo de áridos el valor del asentamiento es inferior a los 15, 30 y 45 minutos, en relación con los hormigones con áridos naturales o con los de porcentajes de reemplazo menores. Muchos autores han confirmado que por lo general se originan mayores cambios en las características del hormigón en estado fresco a medida se incrementa el porcentaje de reemplazo.

3.4.2 Propiedades de durabilidad de hormigón con áridos reciclados

Como se mencionó en algunos de los apartados anteriores, una de las propiedades de mayor importancia para la durabilidad del hormigón es la permisibilidad del mismo de transportar sustancias a través de la estructura porosa que puedan perjudicar el desempeño del mismo durante su vida útil. Un estudio de las propiedades de durabilidad del hormigón en estado endurecido mostró un incremento lineal de la porosidad del hormigón cuando los porcentajes de sustitución de áridos naturales por reciclados son mayores. Este comportamiento se debe principalmente a dos factores, el incremento del volumen de pasta en métodos de mezcla distintos al EMV y el incremento de la porosidad de los áridos reciclados (Omary, Ghorbel, & Wardeh, 2016). Otros estudios experimentales con hormigones de 25 y 30 MPa utilizando áridos reciclados provenientes de hormigón, han mostrado las mismas tendencias, pero han encontrado que incrementando los tiempos de curado y reemplazando la cantidad de cemento por cenizas volantes pueden mejorar los valores de la permeabilidad del hormigón debido a la densificación de la matriz cementicia (Olorunsogo & Padayachee, 2002; Levy & Helene, 2004; Kwan, Ramli, Kam, & Sulieman, 2012).

Con respecto a la resistencia a la penetración de cloruros se ha demostrado en un estudio experimental con diferentes hormigones de 56 días de edad que el aumento de árido reciclado grueso también incrementa la susceptibilidad del hormigón a ser penetrado por cloruros. Esto se debe principalmente a la permeabilidad de los áridos (Andal, Shehata, & Zacarias, 2016). Por otro lado, el aporte de una mayor cantidad de gel de CSH por parte de los áridos reciclados, al cual los cloruros pueden fijarse, parece contrarrestar parcialmente los efectos que tiene el incremento de la porosidad en este tipo de hormigones (Vázquez, Barra, Aponte, Jiménez, & Valls, 2013).

3.5 Fijación de cloruros

Como se mencionó en capítulos anteriores, los cloruros pueden estar presentes en el hormigón disueltos en la solución intersticial, llamados cloruros libres, y pueden migrar hacia el interior del hormigón por capilaridad en ciclos de humidificación y

secado o bien por diferencias de concentración a distintas profundidades respecto a la superficie (difusión). Los cloruros de este tipo son los principales responsables de la corrosión del acero de refuerzo.

Los cloruros pueden estar presentes además en forma de cloruros fijos, cuya fijación envuelve procesos a través de los cuales los iones Cl^- en la solución de los poros se fijan a diferente grado en ciertos hidratos del cemento. El término “cloruros fijos” aplica a cualquier ion cloruro que no es capaz de moverse libremente en la solución porosa del hormigón. Luego, la concentración total de cloruros es la suma de los libres y los fijos.

Los procesos de fijación son clasificados generalmente en fijación de tipo química y física. Aunque estos procesos siguen sin ser bien comprendidos, la clasificación está fundada en los mecanismos que se cree, están implicados.

La fijación química es el resultado de las reacciones ocurridas entre los cloruros y algunas fases del cemento. El contenido de aluminato tricálcico (C_3A) y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) son de especial importancia en este proceso, puesto que al reaccionar con los iones cloruros forman cloroaluminato de calcio hidratado $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, comúnmente conocida como sal de Friedel (Roberts, 1962; Mehta P. K., 1977; Diamond, 1986; Rasheeduzzafar, 1992; Neville A. , 1995; Suryavanshi, Scantlebury, & Lyon, 1996), y cloroferrita de calcio, $\text{C}_3\text{F} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (una sal clorada análoga a la sal de Friedel) respectivamente (Roberts, 1962; Rasheeduzzafar, 1992; Neville A. , 1995; Suryavanshi, Scantlebury, & Lyon, 1996). La sal de Friedel se puede formar tanto para cloruros introducidos durante el amasado como para aquellos que penetran desde fuentes externas más tardíamente en el hormigón. En el primer caso, el aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico del cemento portland reaccionan químicamente con los iones cloruro fijándolos a ellos, sin embargo, en presencia de sulfatos en el cemento, se crea una competencia por la disponibilidad del C_3A entre los iones cloruro y sulfato, por lo cual solo una fracción del contenido original de C_3A y el C_4AF es accesible para la fijación de cloruros. La sal de Friedel tiene una estructura en placas hexagonales apiladas, parecida a la estructura cristalina de la Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. En el caso de los cloruros que ingresan tardíamente en la pasta de cemento endurecida desde fuentes externas la situación es diferente puesto que la mayor parte del C_3A ya ha sido hidratado en ausencia de cloruros y las fases de la etringita y el monosulfato permanecen sin cambios (Mehta P. K., 1977). Algunos estudios han determinado que sólo el aluminato tricálcico no hidratado reacciona con los cloruros que ingresan de fuentes externas para formar la sal de Friedel, quedando la mayoría de estos cloruros libres (Midgley & Illston, 1984).

Por otro lado, la fijación física se produce por la adsorción física de los cloruros (adsorbato) en la superficie de los productos de hidratación, especialmente sobre el

gel de CSH (adsorbente), debido a las fuerzas electrostáticas de Van der Waals entre partículas cargadas (iones cloruro y la superficie del silicato cálcico hidratado). Las superficies del CSH están cargadas negativamente, pero debido a la adsorción de cationes (Ca^{2+} , Na^+) en la solución porosa que es alcalina y la formación de la Capa Stern las superficies se cargan positivamente, lo que lleva a la formación de una doble capa eléctrica difusa y la adsorción de los iones cloruro que están cargados negativamente (Diamond, 1986; Blunk, Gunkel, & Smolczyk, 1986; Larsen, 1998).

La fijación química por lo tanto, se referirá a la capacidad de fijación de los hidratos de aluminio y ferrita, y la física a la capacidad de fijación del CSH. La capacidad de fijación depende de diversos factores, entre ellos la naturaleza y composición del cemento o conglomerante, el contenido de conglomerante, la cantidad de C_3A y C_4AF presentes en el clínker, la presencia de sulfatos, concentración de cloruros, área superficial del CSH, otros iones presentes en la solución porosa, tipo de agregado, relación A/C, tiempo de curado y temperatura.

La fijación de cloruros tiene un impacto importante en la penetración de cloruros en el hormigón, y consecuentemente en el tiempo de iniciación de la corrosión. El proceso de fijación de cloruros elimina parte de los iones cloruro de las vías de difusión y por lo tanto, reduce el gradiente de concentración que estimula la difusión. Por este motivo, la tasa de penetración iones cloruro se ve disminuida y se incrementa el tiempo para que se alcance en la superficie del acero el valor umbral de concentración de cloruros.

3.5.1 Factores que influyen la fijación de cloruros

La composición del conglomerante es importante en los procesos de fijación de cloruros por el rol que juegan el aluminato tricálcico, los silicatos de calcio y el ferroaluminato tetracálcico. En general, la cantidad de cloruros fijados es una función lineal de la cantidad de conglomerante, en especial cerca de la superficie donde el contenido del mismo es alto. Por otra parte, diversos estudios han demostrado un efecto beneficioso del aluminato tricálcico en la fijación de cloruros por la formación de la Sal de Friedel, en especial aquellos presentes durante el amasado (Roberts, 1962; Rasheeduzzafar, 1992; Suryavanshi, Scantlebury, & Lyon, 1995), lo que implica que la concentración de cloruros en la solución porosa de la pasta de cemento decrece con el incremento del contenido de C_3A en el conglomerante. En el caso de cloruros introducidos posteriormente con el hormigón en estado endurecido, el contenido de C_3A parece tener igual importancia, aunque menos evidente que para el caso de cloruros introducidos en el amasado.

Los silicatos de calcio, según diversos estudios, disponen también de una importante capacidad de fijación de cloruros. Se ha encontrado que el silicato tricálcico C_3S es

responsable de fijar una importante cantidad de cloruros, tanto de CaCl_2 como de NaCl presentes en el amasado. De igual manera, en el caso de cloruros externos, diversos estudios han demostrado la capacidad de fijación del C_3S , siendo la adsorción física al CSH el mecanismo predominante de fijación (Beaudoin, Ramachandran, & Feldman, 1990; Blunk, Gunkel, & Smolczyk, 1986).

En el caso del ferroaluminato tetracálcico, parece tener un rol en los procesos de fijación de cloruros que depende del contenido de C_3A . Un estudio llevado a cabo con dos tipos de cemento, reveló que el cemento con menor contenido de C_3A logró fijar una mayor cantidad de cloruros debido a que la suma del C_3A y el C_4AF era mayor que el del otro cemento sujeto a evaluación (Byfors, 1990). Sin embargo, la mayoría de los estudios coinciden en que es el C_3A el que tiene mayor influencia, entre los componentes del cemento, en la capacidad de fijación de los cloruros (Blunk, Gunkel, & Smolczyk, 1986; Roberts, 1962).

La concentración de cloruros es, como es de esperarse, de importancia similar a la composición del conglomerante puesto que se ha encontrado una disminución del contenido de C_3A a medida se incrementa la adición de cloruros. Esto ocurre ya que el aluminato tricálcico y otros hidratos del cemento tienen una capacidad limitada de fijar cloruros y se van agotando paulatinamente por lo cual, más cloruros quedarán libres en la solución porosa del hormigón.

La composición de la solución de los poros es otro factor que influye en la fijación de cloruros, especialmente la concentración de otros iones en la solución como los hidróxidos. Un estudio experimental con hormigones preparados con contenidos idénticos de cemento y cloruros reveló que sólo se presentaban concentraciones de cloruro diferentes si las concentraciones de iones hidróxido divergían, esto debido a que estos iones compiten con los cloruros por los lugares de adsorción disponibles (Tritthart, 1989). El tipo de cloruros presentes en la solución afecta también la capacidad de fijación, siendo mayor para el CaCl_2 que para el NaCl (Gjørsv & Vennesland, 1987).

La influencia de la temperatura en la fijación de cloruros ha sido abordada en diversos estudios experimentales llevados a cabo con muestras a las que se le adicionaron cloruros durante el amasado, arrojando como resultado un descenso en la capacidad de fijación a medida se incrementaba la temperatura (Roberts, 1962; Hussain & Rasheeduzzafar, 1993).

Finalmente, la relación A/C es un factor que ha sido ampliamente estudiado. Existe una tendencia a aumentar la fijación de cloruros a medida se incrementa la relación A/C. Tres estudios llevados a cabo con hormigones de relaciones A/C 0.4, 0.5 y 0.6 muestran que existe una diferencia notable cuando se compara la fijación de cloruros entre los dos primeros hormigones, sin embargo, esta diferencia se vuelve más

pequeña entre los hormigones 0.5 y 0.6. La razón se atribuye al grado de hidratación que determina la cantidad de productos derivados de esta como el CSH, y que tienen un rol, como se ha visto ya, en la fijación de los cloruros. Además, al existir mayor porosidad en relaciones A/C altas, los lugares de adsorción de cloruros quedan más expuestos y más accesibles a los iones Cl⁻.

3.6 Procesos de absorción y transporte de agua en el hormigón

Los mecanismos de transporte de agua principales en el hormigón a través de la cual penetran agentes perjudiciales como los iones cloruro son la difusión y la succión capilar. En la difusión los procesos de transporte de sustancias disueltas en agua tienen lugar por gradientes de concentración, es decir, los cloruros se desplazan por la película de agua desde las zonas de mayor concentración a aquellas de menor concentración, existiendo una tendencia al equilibrio. La succión capilar por su parte ocurre cuando la superficie del hormigón está mojada, ya sea por lluvia o por salpicaduras, y depende principalmente de la energía superficial de los poros que produce fuerzas que provocan la entrada de agua en los mismos. El transporte de agua por capilaridad es el mecanismo dominante en el ingreso de cloruros y otras sustancias nocivas en el hormigón ya que la difusión por sí sola comprende procesos más lentos. Como ya se ha mencionado, conocer la capacidad de transporte de agua y humedad al interior del hormigón es fundamental para estimar la vida útil de una estructura ya que se puede predecir la velocidad de penetración de iones perjudiciales para sus materiales. El entendimiento de estos mecanismos de transporte es importante además para conocer las contribuciones que tienen en un hormigón específico la difusión y la absorción capilar.

Los resultados de diversos estudios experimentales relacionados con la absorción capilar han coincidido en que la profundidad de penetración del agua por succión es proporcional a la raíz del tiempo, por lo cual, a través de esta relación se puede determinar el ratio de absorción. Esta relación es la mostrada en la Ecuación 1 y se puede reescribir de la forma:

$$\frac{W}{A} = K\sqrt{t} \quad \text{Ecuación 17}$$

donde W es el volumen de agua absorbido, A es el área de la superficie expuesta, K es el coeficiente de absorción y t el tiempo (Martys & Ferraris, 1997).

Esta ecuación resulta eficiente para modelar la absorción capilar en períodos cortos de tiempo y los efectos superficiales. La determinación del ratio de absorción es más complejo cuando pretende hacerse a largo plazo ya que este puede variar en el tiempo debido a cambios que ocurren en la composición de la solución porosa o en la

estructura porosa del hormigón producto de la reacción del agua con la matriz cementicia sólida. Por ejemplo, el movimiento de agua en el interior del hormigón produce lixiviación que aumenta la porosidad, es decir, aumenta el tamaño y la interconexión de los poros lo que incrementará la absorción capilar. Por otro lado, el agua absorbida traerá como consecuencia una mayor hidratación lo que reducirá el tamaño de los poros en la matriz cementicia, produciendo un efecto inverso a la lixiviación, es decir, reducirá la absorción de agua.

Las variables que moldean esta estructura porosa como el diseño de mezcla (especialmente la relación A/C), el curado y las condiciones ambientales o de contorno que repercutirán en el grado de saturación de los poros, tienen una influencia directa en la capacidad y velocidad de absorción de agua del hormigón. Martys et al. (1997) llevó a cabo un estudio en el que se relacionaron dichas variables con la absorción por capilaridad del hormigón. Se ensayaron hormigones con procesos de curado de 1 y 28 días de duración, teniendo los especímenes con el proceso de curado más prolongado un total de agua absorbida menor en aproximadamente 20%. Por lo cual, mientras más prolongado es el curado, menor es la capacidad de absorción del hormigón.

Por otro lado, se comparó la absorción de un hormigón con una relación A/C de 0.6, finos/cemento de 2.75, grava/cemento de 1.43 y aire ocluido de 6% llamada “Mezcla 1” con otro cuya relación A/C es 0.36, finos/cemento de 2.02, grava/cemento de 1.12 y aditivo superplastificante llamado “Mezcla 2”. Los resultados muestran como es de esperarse, una mayor absorción de la “Mezcla 1” ya que su porosidad es mayor debido a la relación A/C, áridos/cemento y el aire ocluido. En ambas dosificaciones el agua absorbida fue proporcional a $t^{1/2}$ durante un período de unas pocas horas, habiendo luego un decrecimiento importante en el ritmo de absorción. Esto ocurre ya que el proceso de absorción en las primeras horas está gobernado por los poros capilares, mientras que en edades más avanzadas son los poros de gel los que determinan el ritmo de absorción, además, como es natural, a medida el agua satura los poros encuentra menos espacios para llenar por lo que la velocidad de absorción se ve disminuida, por lo cual el grado de saturación de los poros es determinante en este aspecto (Martys & Ferraris, 1997). Esto explica por ejemplo, que en una estructura en ambiente marino el riesgo de deterioro por corrosión es habitualmente mayor en la zona de oscilación de las mareas que en la sumergida, ya que en esta última, además de la baja concentración de oxígeno, los poros se encuentran saturados y el transporte de cloruros está gobernado por la difusión cuya velocidad es lenta, mientras que en la zona de oscilación de mareas, los ciclos de humidificación y secado evitan que los poros estén saturados y por tanto, el transporte de agua y agentes perjudiciales se produce por succión capilar.

Puesto que el ritmo de absorción del hormigón depende del grado de saturación de los poros, para la estimación de la vida útil de una estructura, la clase de exposición es siempre un factor a considerar. El coeficiente de absorción capilar relaciona el ritmo de absorción con el grado de saturación de los poros, con lo cual se pueden crear modelos de predicción de transporte de humedad. De igual manera, aspectos relativos a la calidad de los materiales, como la relación A/C o los procesos de curado deben ser tomados en cuenta para lograr una vida útil más prolongada.

4 MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 Materiales

En esta sección se presenta una lista de materiales utilizados para la elaboración de los hormigones, provenientes de la tesis doctoral de Cristian Jiménez Fernández, presentada en marzo de 2015 en la Universidad Politécnica de Cataluña sede Barcelona. La edad de curado de estos hormigones, como se intuye por las fechas de elaboración, es de 3 años en cámara húmeda. Se realiza una breve descripción de cada uno de los materiales utilizados, en especial de los áridos con una caracterización basada en su composición y sus propiedades químicas y físicas.

Además, en los materiales que se presentan se incluyen aquellos utilizados en la campaña de ensayos destinada a evaluar diversos parámetros de durabilidad de tres tipos de hormigón.

Para la elaboración de los hormigones abordados en este estudio se utilizó:

- Agua proveniente de la red
- CEM I 52.5R (Cemento Portland sin adiciones o tipo I)
- Un (1) árido natural calizo triturado fino
- Un (1) árido natural calizo triturado grueso
- Un (1) árido grueso reciclado (Grava)
- Aditivo superplastificante BASF MasterGlenium Sky 604

4.1.1 Hormigón

4.1.1.1 Cemento

El cemento utilizado es un tipo I 52.5R proveniente de la empresa “Cementos Molins Industrial S.A.” ubicada en Sant Vicenç dels Horts, Barcelona. Este es un cemento de alta resistencia que puede alcanzar los 30 MPa en los primeros dos días y resistencias superiores a 52.5 MPa a los 28 días, además de tiempos de inicio de fraguado más reducidos (≥ 45 min). Cumple con los requisitos mecánicos, físicos, químicos y de durabilidad, además de la composición exigidos por la Norma UNE-EN 197-1:2011. Este cemento posee una composición de 95 a 100% de clínker y entre un 0 y 5% de componentes menores. Según su ficha técnica contiene 3,4% de sulfatos, 0,04% de cloruros y 0,7% de residuos insolubles. La pérdida por calcinación es del 2,5% (Jimenez, 2015).

4.1.1.2 Aditivos

Fue utilizado un aditivo superplastificante reductor de agua de alta actividad a base de policarboxilatos de la empresa BASF, MasterGlenium Sky 604. El mismo tiene un pH a 20°C de $5,5 \pm 1$, densidad de $1,048 \pm 0,02 \text{ gr/cm}^3$ y contenido de cloruros menor al 0,1% (Jimenez, 2015).

4.1.1.3 Áridos

Los áridos utilizados en la elaboración del hormigón comprenden los finos naturales ($< 4 \text{ mm}$), grueso natural y grueso reciclado. El árido grueso incluye uno de material calizo triturado natural y otro reciclado obtenido de una planta de reciclaje local y procesado a través de métodos normalizados que incluyen la recepción y varios ciclos de remoción de materiales indeseados, trituración y selección.

Previamente a la elaboración del hormigón, los áridos se sometieron a diversos ensayos físicos siguiendo los códigos correspondientes para cada ensayo. En el análisis de densidad y absorción de agua se utilizó el código UNE-EN 1097-6:2014, para la clasificación de los componentes del árido reciclado el código UNE-EN 933-11:2009 y finalmente para la determinación del contenido de mortero adherido se utilizó un método en el cual se somete al árido reciclado a un proceso repetitivo de calentamiento a más de 500 °C y posterior enfriamiento a través de su saturación en agua con el propósito de crear tensiones internas debido a la pérdida súbita de agua, así como expansiones y contracciones diferenciales de los componentes del árido con la finalidad de separar el mortero del árido natural (Barra, 1996; Jimenez, 2015).

Se determinó la densidad de las muestras bajo tres condiciones diferentes, la densidad de partículas (D_p), densidad saturada superficialmente seca (D_{SSS}) y densidad seca (D_s). A partir de estos datos, se obtuvo la absorción de agua. Los valores de las densidades y porcentajes de absorción de todos los áridos naturales (gruesos y finos) no reflejan diferencias significativas entre ellos, pero sí lo hacen los del árido reciclado, que debido al mortero adherido muestra densidades más bajas y un porcentaje de absorción mucho más alto.

Por otro lado, se determinó la composición del árido reciclado través de un método de reconocimiento visual y separación de los materiales constituyentes. El 59% son productos de hormigón, mortero y áridos naturales con mortero adherido, 37% de áridos naturales no mezclados y 4% de material bituminoso. Los materiales bituminosos están asociados a problemas de resistencia y adherencia en el hormigón, aunque en este árido en particular, la cantidad de este material es baja (Jimenez, 2015).

Utilizando el método del ataque térmico comentado en este apartado se determinó, luego de separar y pesar los residuos obtenidos, la cantidad de árido natural y mortero inicialmente adherido a él. Para este árido en particular, el mortero adherido representaba un 35% del material total (Jimenez, 2015).

4.1.1.4 Diseños de mezcla y propiedades

Como ya se mencionó, en este estudio se evalúan tres tipos de hormigón en función a diversos parámetros de durabilidad, cuyos componentes son los brevemente comentados en los apartados anteriores, y cuyas características son las siguientes:

- Un hormigón control, elaborado con áridos finos y gruesos naturales y cuyo diseño de mezcla se realizó bajo la metodología Bolomey. La relación A/C es de 0.4 y el contenido de aditivo superplastificante es de 1%. La fecha de elaboración del hormigón es el 16/04/2013.
- Un hormigón con un 20% de árido grueso reciclado, con una mezcla diseñada bajo la metodología Reemplazo Directo de Volumen (DVR por sus siglas en inglés). La relación A/C es de 0.4 y el contenido de aditivo superplastificante es de 1%. La fecha de elaboración del hormigón es el 30/04/2013.
- Un hormigón con un 20% de árido grueso reciclado, cuyo diseño de mezcla se realizó bajo la metodología del Volumen de Mortero Equivalente (EMV por sus siglas en inglés). La relación A/C es de 0.4 y el contenido de aditivo superplastificante es de 1.7%. La fecha de elaboración es el 30/05/2013.

La Tabla 1 muestra las proporciones de las mezclas de cada uno de los hormigones, los cuales son identificados de acuerdo a la metodología base de mezcla (B de Bolomey), seguido de la categoría del hormigón (CON de convencional, DVR ó EMV), porcentaje de reemplazo de árido natural por reciclado, la relación A/C y finalmente el porcentaje de superplastificante utilizado.

Tabla 1. Diseños de mezcla de los hormigones ensayados (Jimenez, 2015)

| ID del hormigón | Agua (kg) | Cemento (kg) | Árido natural fino (kg) | Árido natural grueso (kg) | Árido reciclado grueso (kg) | SP (kg) |
|-----------------------------|-----------|--------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------|
| B _{CON} /0.4-1 | 182 | 455 | 835 | 1031 | - | 4.6 |
| B _{DVR20} /0.4-1 | 182 | 455 | 835 | 794 | 203 | 4.6 |
| B _{EMV20} /0.4-1.7 | 169 | 422 | 774 | 887 | 227 | 7.2 |

Se determinaron además algunas propiedades de estos hormigones en estado endurecido, como el de la densidad, realizado de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6:2014. Los resultados expresados en la Figura 4, muestran diferencias muy pequeñas entre un tipo de hormigón y otro. A pesar de esto, el hormigón que muestra el menor valor es el BDVR20 como es de esperarse por la cantidad de mortero que tienen adherido sus áridos.

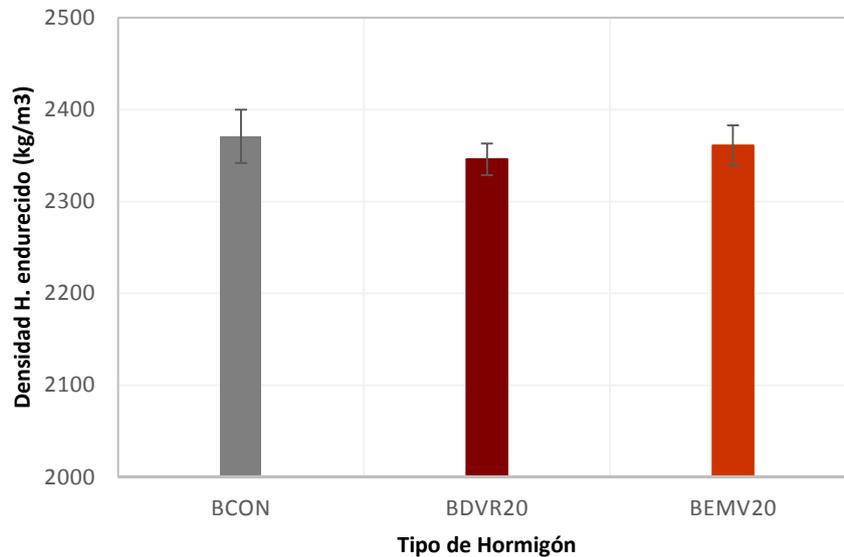


Figura 4. Densidad del hormigón en estado endurecido, adaptado de Jimenez (2015)

El ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión se realizó siguiendo las prescripciones de la norma UNE-EN 12390-3:2009.

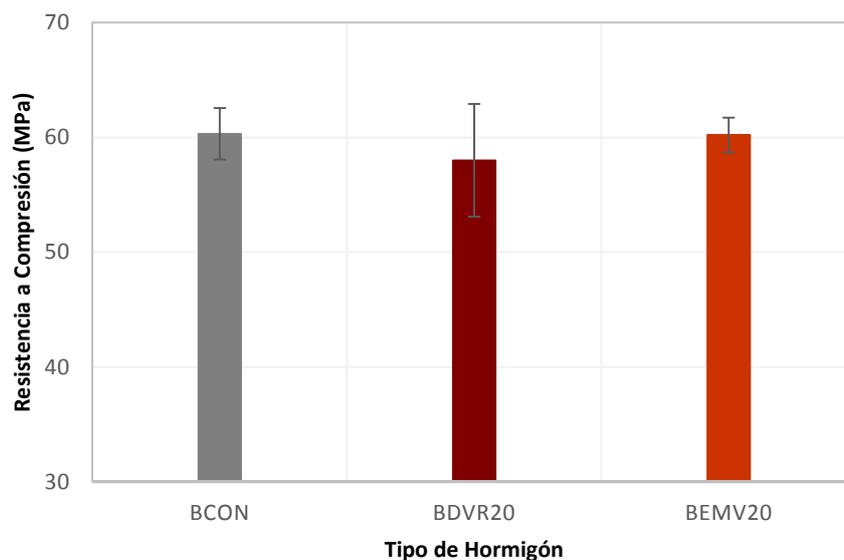


Figura 5. Resistencia a la compresión de los hormigones estudiados, adaptado de Jimenez (2015)

Los resultados (Figura 5) mostraron resistencias a la compresión muy similares entre los hormigones B_{CON} y B_{EMV20}, incluso en la desviación estándar, aun cuando el último tiene aproximadamente 7% menos cemento. El hormigón B_{DVR20} por su parte, es el que arrojó el valor de resistencia más bajo, aunque una desviación estándar significativamente mayor, alcanzando valores máximos incluso por encima de los demás tipos de hormigón, por lo cual no hay un resultado concluyente de este parámetro. Si es importante resaltar el desempeño a compresión del hormigón fabricado por el método EMV ya que, como se mencionó, tiene un menor contenido de cemento lo que lo hace más eficiente en este aspecto.

4.1.2 Agua destilada y ultra pura

Se utilizó agua destilada para la preparación de las soluciones de NaCl en el ensayo de difusión de cloruros. Por otro lado, se utilizó agua destilada ultra pura para la preparación de las soluciones del ensayo de fijación de cloruros y las soluciones acuosas de LiCl, MgCl₂, NaBr, NaCl y KCl con el propósito de generar condiciones específicas de humedad relativa en los contenedores correspondientes al ensayo de adsorción desorción.

Para el ensayo de succión capilar y para la saturación de las probetas en el ensayo de adsorción desorción de utilizó agua de la red.

4.1.3 Reactivos

Para todos los ensayos fueron utilizados reactivos de alta pureza para evitar que la exactitud de la determinación se viera disminuida. Los reactivos utilizados incluyen diversas sales como el cloruro de litio, cloruro de magnesio, bromuro de sodio, cloruro de sodio y cloruro de potasio. Por otro lado, se ha utilizado el nitrato de plata AgNO₃ 0,1 M como reactivo titrante en la determinación de la concentración de cloruros de diversas soluciones de los ensayos de fijación y difusión de cloruros.

4.1.4 Impermeabilizantes de probetas

Para la impermeabilización de las probetas del ensayo de succión capilar se utilizó un revestimiento elástico impermeabilizante (caucho líquido) marca Paigum, PAI 99. Para el caso de las probetas sumergidas en la solución de NaCl en el ensayo de difusión de cloruros se utilizó un adhesivo estructural y mortero de reparación (a base de resinas epoxi) marca Sika, Sikadur® -31 EF de dos componentes.

4.2 Metodología

En este sub-apartado se presenta la metodología utilizada en la campaña experimental llevada a cabo y constituida por cuatro ensayos. Sus resultados serán indicadores de la resistencia de los hormigones fabricados con áridos reciclados (B_{DVR20} y B_{EMV20}) frente a la penetración de cloruros, que es uno de los mecanismos de deterioro principales relacionado con la corrosión de armaduras, así como también de la capacidad de absorción y transporte de agua a través de su estructura porosa. Como medida de referencia, se evalúa además un hormigón fabricado con áridos naturales.

4.2.1 Preparación de las muestras

Las muestras de los hormigones se extrajeron de probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 14 cm de altura que se mantuvieron desde la fecha de fabricación en una cámara húmeda con condiciones de temperatura y humedad constantes. La humedad de dicho espacio es de $98 \pm 2^\circ\text{C}$. Como ya se mencionó, los hormigones fueron fabricados en el año 2013 por lo que tenían 3 años de curado en el momento en el que se llevó a cabo este estudio.

Una vez recogidos todos los datos y la información relevante de las probetas, como la fecha de fabricación, ID del hormigón, relación A/C, aditivo superplastificante, dosificaciones, entre otros, se procedió a cortarlas en una cortadora eléctrica fija con disco de diamante. Las dimensiones de los especímenes obtenidos serán especificadas en los apartados correspondientes a cada ensayo. Una vez cortados, se procedió a limpiar todos los especímenes para remover partículas sueltas de las superficies y se verificó utilizando fenolftaleína, como se muestra en la Figura 6, que no hubiera carbonatación en los especímenes que pudiera alterar los resultados de los ensayos.

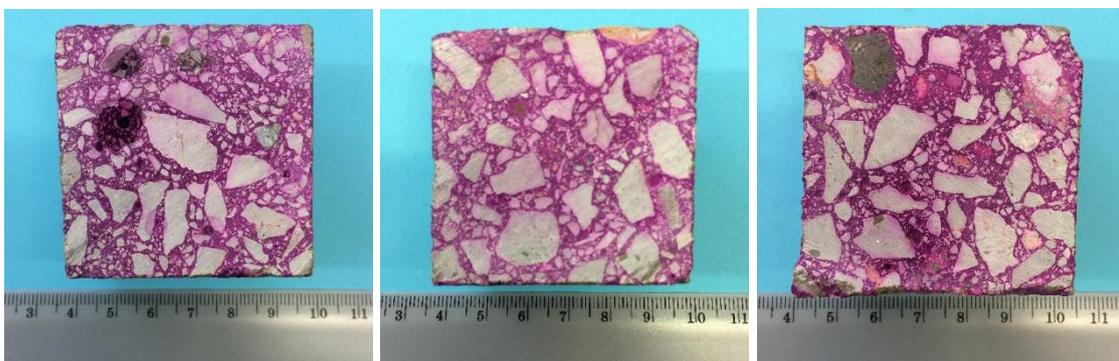


Figura 6. Verificación de la no carbonatación de los hormigones

Los especímenes correspondientes al ensayo de fijación de cloruros se colocaron en la estufa a 100°C durante 24 horas. Los especímenes de succión capilar y difusión de cloruros se colocaron en la estufa a 40°C durante tres semanas, mientras que los de adsorción-desorción en la misma estufa por un período de 4 semanas. Se registraban los pesos de los especímenes cada dos días durante el proceso de secado.

Se verificó el contenido inicial de cloruros totales de todos los hormigones previamente al inicio de los ensayos, utilizando 5 gramos de material triturado (de cada tipo de hormigón) que pasa por el tamiz 0,063 mm. El proceso incluye colocar la muestra en un recipiente de 250 ml, añadir 50 ml de HNO₃ (1 parte de HNO₃ y dos partes de H₂O o agua destilada), cubrir con vidrio de reloj y calentar la muestra hasta que hierva. Luego se filtra, enjuagando cuatro veces con agua destilada y se verifica en el tritador con AgNO₃ (nitrato de plata) el contenido de cloruros totales inicial de las muestras de hormigón.

4.2.2 Procedimiento de ensayo de fijación de cloruros

El ensayo tiene como objetivo determinar y comparar las capacidades de adsorción y fijación de cloruros de los hormigones con áridos naturales y reciclados utilizados en este estudio y comentados en apartados anteriores. El ensayo solo comprende la incorporación de cloruros posteriormente a la hidratación del cemento, es decir, en el hormigón endurecido. Se utilizan los modelos matemáticos de isoterma de fijación de Langmuir y de Freundlich para representar estos procesos de adsorción y fijación.

Las muestras de fijación de cloruros se extrajeron de las probetas cilíndricas originales no siguiendo requerimientos dimensionales sino de peso, siendo necesario obtener al menos 450 gramos de muestra triturada de cada hormigón. Una vez transcurridas las 24 horas en el horno a 100°C, se rompieron las muestras de cada tipo de hormigón con martillo de modo que los trozos fueran lo suficientemente pequeños como para pasar por la trituradora de mandíbulas. El proceso de machaqueo se lleva a cabo de manera tal que el 100% del material obtenido pueda pasar por el tamiz de 1 mm. Luego se toman muestras representativas (14 de cada tipo de hormigón) de 30 gramos cada una, con un equipo divisor de muestras marca Retsch® modelo PT100. Estas muestras se colocan, cada una por separado, en recipientes identificados y limpios de 100 ml de capacidad.

Se preparan 7 soluciones de cloruro de sodio de distintas molaridades (2 M; 1 M; 0,5 M; 0,25 M; 0,125 M; 0,0625 M y 0,03125 M) a partir de NaCl sólido y agua destilada, y se verifican las concentraciones iniciales de cloruros en estas soluciones con un titulador marca Crison, modelo MicroTT 2050, además del pH y la conductividad con un pH-metro Crison Basic 20+ y un conductímetro Crison GLP31 respectivamente.

Con cada una de las soluciones preparadas se rellenan dos de los recipientes de cada tipo de hormigón que contienen 30 gramos de muestra, a una relación 2:1, es decir, 60 gramos de solución. Por lo cual, se preparan por duplicado, recipientes con 30 gramos de muestra triturada de hormigón y 60 gramos de solución, para cada tipo de hormigón y cada molaridad, con una precisión de $\pm 0,1$ g.

Una vez por semana, se agitaron las muestras en un rotómetro por 30 minutos y luego se dejaron en reposo durante otros 30 minutos para finalmente medir el pH y la conductividad de cada muestra. Tanto para la medición del pH como de la conductividad se realizan cuatro lecturas, omitiendo la primera y registrando las otras tres. El valor se determina calculando la media aritmética de las tres medidas registradas.

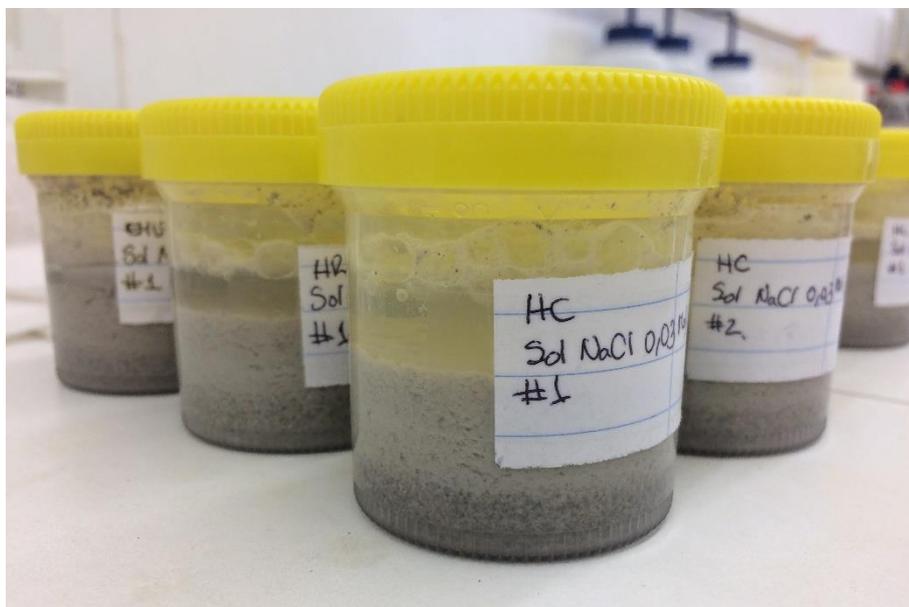


Figura 7. Recipientes con muestras de los tres tipos de hormigón en solución de NaCl

Una vez se estabilizan los valores de pH y conductividad, se analizan las soluciones de NaCl en las cuales se sumergieron las muestras trituradas (42 soluciones, 14 por cada tipo de hormigón) en el titrador para determinar la disminución de la concentración de cloruros libres y con ello, la cantidad de cloruros fijados en la muestra sólida. Luego se compara el comportamiento de los distintos tipos de hormigón y analiza las diferencias entre los procesos de adsorción y cómo influyen en la cantidad de cloruros fijados.

A través de los modelos de isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich se representan los fenómenos de adsorción, siendo el primero el más simple y cuya forma se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_b = \frac{a \cdot C_f}{(1+b \cdot C_f)} \quad \text{Ecuación 18}$$

donde:

C_b = es la cantidad de cloruros fijados o adsorbidos,

a y b = son constantes de fijación cuyos valores se relacionan con la composición del conglomerante, y

C_f = es la cantidad de cloruros libres.

La isoterma de Langmuir describe la adsorción de un gas sobre una superficie sólida, formando una capa de espesor monomolecular, es decir, que cada sitio de la superficie puede ser ocupado por una sola molécula del gas o sorbato (Villagrán & Matiasich, 2004). Cuando las concentraciones de cloruros libres son muy altas, la curva de Langmuir adopta una pendiente que se aproxima a cero lo que indica el agotamiento de la capacidad de adsorción, por lo cual, esta isoterma se emplea de forma eficaz en concentraciones inferiores a 0,05 M (Tang & Nilsson, 1993).

El modelo de Freundlich es una adaptación del modelo de Langmuir y está descrito por la siguiente ecuación:

$$C_b = a \cdot C_f^\beta \quad \text{Ecuación 19}$$

donde:

C_b = es la cantidad de cloruros fijados o adsorbidos,

a y β = son constantes de fijación cuyos valores se relacionan con la composición del conglomerante, y

C_f = es la cantidad de cloruros libres.

La isoterma de Freundlich comparada con la de Langmuir, describe mejor los procesos de adsorción a concentraciones altas de cloruros libres, ya que, en estos casos su pendiente es siempre mayor que la de Langmuir, lo que indica que admite una capacidad de fijación mayor. Esto se debe principalmente a que no ocurre una adsorción monocapa como en concentraciones bajas, sino que se producen adsorciones más complejas multicapa que son función de la humedad relativa y la estructura porosa (Tang & Nilsson, 1995). Por lo tanto, la ecuación de Freundlich funciona eficazmente para concentraciones de cloruros libres superiores a 0,01 M (Tang & Nilsson, 1993). La Figura 8 ilustra este concepto, la cual permite apreciar la diferencia de pendientes de las curvas en cada concentración de cloruros libres.

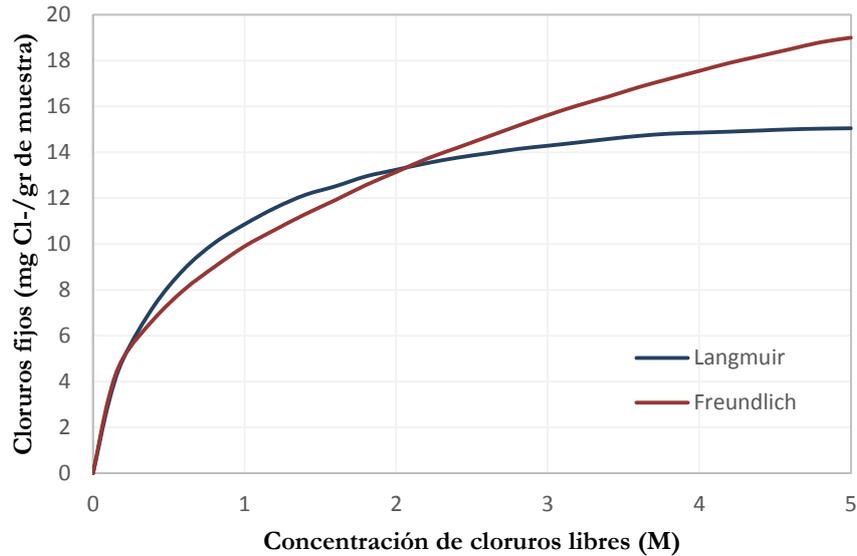


Figura 8. Isotermas de fijación de cloruros que muestran las diferencias de pendientes a concentraciones altas de cloruros libres, adaptado de Tang & Nilsson (1993).

4.2.3 Procedimiento de ensayo de difusión de cloruros

El objetivo del ensayo es determinar la resistencia a la penetración de cloruros por difusión en los hormigones endurecidos y saturados, a partir de parámetros como el de la concentración inicial de cloruros, el contenido de cloruros a distintas profundidades desde la superficie expuesta a un tiempo t , el coeficiente de difusión de cloruros efectivo, y las condiciones de contorno de la superficie expuesta, siguiendo el procedimiento descrito en la norma (NT Build 443, 1995). Los modelos de difusión pura aplican a especímenes saturados y sumergidos donde no hay movimiento de agua en su interior.

Se utilizaron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 5 cm de alto de cada tipo de hormigón (B_{CON}, B_{DVR20}, B_{EMV20}), en donde todas sus caras son superficie original excepto una, producto del corte de un extremo, la cual será expuesta a la solución de NaCl.

Los especímenes se extraen de la estufa a 40°C luego de que las funciones de sus pesos con respecto al tiempo muestren un comportamiento asintótico. Se impermeabilizan todas sus caras con el mortero de reparación Sika, Sikadur® -31 EF de dos componentes, excepto la cara cortada. Una vez seco el mortero impermeabilizante se sumergen los especímenes en una solución de hidróxido de calcio Ca(OH)₂ en un contenedor de plástico cerrado a una temperatura constante aproximada de 23°C. Se toman los pesos de las probetas diariamente y se mantienen

inmersas en la solución hasta que la diferencia de masa no supere el 0,1% en 24 horas, de hecho, se retiraron cuando estas diferencias oscilaban entre el 0,01% y el 0,03%.

Luego se prepara una solución acuosa con una concentración de $165 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de NaCl por dm^3 de solución, es decir, que al inicio la concentración de cloruros debe ser de $100,09 \text{ g Cl}^-/\text{l} \pm 0,607 \text{ g Cl}^-/\text{l}$, ya que:

$$1 \text{ mol NaCl} = 1 \text{ mol Na}^+ \cdot 22,9898 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 1 \text{ mol Cl}^- \cdot 35,453 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 58,4428 \text{ g NaCl}$$

$$165 \frac{\text{g NaCl}}{\text{l}} \cdot \frac{1 \text{ mol NaCl}}{58,4428 \text{ g NaCl}} \cdot \frac{1 \text{ mol Cl}^-}{1 \text{ mol NaCl}} \cdot \frac{35,453 \text{ g Cl}^-}{1 \text{ mol Cl}^-} = 100,094 \text{ g Cl}^-/\text{l}$$

Se verifica entonces, en el titrador, la concentración de cloruros en la solución preparada y sus valores de pH y conductividad.

Se sustituye la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la cual se sumergieron las probetas, por la de NaCl, con previa limpieza del contenedor de plástico. La relación entre el área expuesta de las probetas (en cm^2) y el volumen total de solución (en dm^3) debe adoptar valores entre 20 y 80. Para este caso, el valor de la relación era de 47. El tiempo de exposición es de 35 días.

Transcurrido el tiempo de exposición se dejan secar las probetas y se trituran partiendo de la superficie expuesta, con una fresadora, en ocho capas paralelas a dicha superficie, cuyos espesores son de 1 mm, 2 mm, 3 mm, 3 mm, 3 mm, 4 mm, 4 mm y 5 mm. Se recoge el material de cada capa por separado, y posteriormente se vuelven a triturar en el molino de anillos de manera que pasen por el tamiz 0,063 mm para realizar el análisis de contenido de cloruros totales con el procedimiento descrito en el apartado 4.2.1 y cloruros libres por el comentado en el apartado 4.2.2.

Una vez obtenida la concentración de cloruros en las diversas capas extraídas $C_{(x,t)}$ y el contenido inicial de cloruros en el hormigón C_i (determinado por el procedimiento descrito en el apartado 4.2.1), se determina el coeficiente de transporte de cloruros efectivo D_e y la condición de contorno en la superficie expuesta C_s ajustando la Ecuación 20 a los contenidos de cloruros medidos por medio de un análisis de regresión no lineal de acuerdo con el método de mínimos cuadrados. El primer punto del perfil determinado desde la cara cortada se omite en el análisis de regresión. Los demás puntos se ponderan por igual (NT Build 443, 1995).

$$C_{(x,t)} = C_s - (C_s - C_i) \cdot \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}} \right) \quad \text{Ecuación 20}$$

donde:

$C_{(x,t)}$ = es la concentración de cloruros medida en el tiempo t a una profundidad x , en % de masa seca de hormigón,

C_s = es la condición de contorno en la superficie expuesta, en % de masa seca de hormigón,

C_i = es la concentración de cloruros inicial, en % de masa seca de hormigón,

D_e = es el coeficiente de transporte efectivo de cloruros, en m^2/s , y

erf = es la función error definida por la siguiente ecuación:

$$erf(z) = 2 / \sqrt{\pi} \cdot \int_0^z \exp(-u^2) du \quad \text{Ecuación 21}$$

4.2.4 Procedimiento de ensayo de succión capilar y secado

4.2.4.1 Ensayo de succión capilar

El ensayo se realiza en base a las normas ASTM C1585-04 (2004) y ASTM C642-97 (1997). El objetivo del ensayo es la determinación del ritmo de absorción de agua por succión capilar del hormigón no saturado a través de la medición del incremento de la masa del espécimen, resultante de la absorción de agua como una función del tiempo. Posteriormente, se determina la pérdida de masa en el tiempo debido a un proceso de secado unidimensional y transporte de humedad de los mismos especímenes, inicialmente saturados, con ambos extremos sometidos a condiciones de humedad y temperatura constantes. Finalmente, con los datos extraídos de los ensayos se determina la densidad aparente y seca, la absorción y el volumen de poros de tres tipos de hormigón.

Se utilizaron especímenes de $(50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}) \pm 0,8\text{mm}$, dos por cada tipo de hormigón (B_{CON} , B_{DVR20} , B_{EMV20}). Las dos caras que estarán expuestas no son superficie original sino cortada.

Una vez se estabiliza el peso de los especímenes, se retiran de la estufa a 40°C , se mide con un calibrador el área de las superficies que estarán expuestas al agua y se impermeabilizan todas sus caras excepto dos extremos (caras opuestas) con el revestimiento elástico impermeabilizante a base de caucho. Una vez seco el material impermeabilizante, se mide la masa inicial del espécimen redondeando al 0,01 g más cercano.

En un contenedor se coloca un dispositivo de soporte que permita mantener los especímenes separados del fondo y con ello el libre acceso de agua a la superficie que estará expuesta. Se llena el contenedor con agua de manera tal que su nivel esté aproximadamente 3 mm por encima de la parte superior del dispositivo de soporte y se colocan los especímenes sobre él, con la cara sin impermeabilizar en contacto con el agua. Se anota la hora exacta de contacto inicial con el agua ($t = 0$), y se pesan los

especímenes partiendo de ese momento, en los tiempos $1 \text{ min} \pm 2\text{s}$, $5 \text{ min} \pm 10\text{s}$, $10 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, $15 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, $30 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, $1 \text{ hora} \pm 2 \text{ min}$, $2 \text{ horas} \pm 5 \text{ min}$, $4 \text{ horas} \pm 5 \text{ min}$ y $6 \text{ horas} \pm 5 \text{ min}$. Luego una vez cada 24 horas con una tolerancia de $\pm 2 \text{ horas}$ hasta que el incremento de la masa en función del tiempo muestre un comportamiento asintótico. Se realiza entonces el cálculo de la absorción, I , con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{m_t}{a \cdot d} \quad \text{Ecuación 22}$$

donde:

I = la absorción,

m_t = el cambio de la masa del espécimen, en gramos, en el tiempo t ,

a = el área de la superficie expuesta del espécimen, en mm^2 , y

d = la densidad del agua en g/mm^3 .



Figura 9. Ensayo de especímenes por succión capilar

La velocidad inicial de absorción está definida como la pendiente de la línea que mejor se ajusta al trazado de I como función de la raíz cuadrada del tiempo, para las mediciones obtenidas durante las primeras 6 horas de ensayo. La velocidad de absorción secundaria se define de la misma forma, pero usando todas las medidas tomadas posteriormente a las primeras 6 horas.

4.2.4.2 Saturación y ensayo de secado

Una vez culminado el ensayo de succión capilar, se extraen los especímenes del contenedor y se saturan para poder iniciar el ensayo de secado. El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM C1792-14 (2014). El proceso de saturación se hace al vacío, colocando los especímenes dentro de un contenedor de vidrio sellado, conectado a una bomba, que hará vacío durante 3 horas antes de añadir agua al contenedor. Pasado este tiempo, se añade agua lentamente a través de un embudo de separación, instalado en la parte superior del contenedor, hasta que cubra todas las probetas y se mantiene la condición de vacío 1 hora más. Las superficies expuestas de las probetas deben estar en contacto directo con el agua.



Figura 10. Saturación de especímenes con bomba de vacío

Una vez los especímenes están saturados, se toman sus pesos sumergidos. Luego, se extraen del agua uno por uno y se colocan en un ambiente de temperatura y humedad controladas. Se elimina el exceso de agua en las superficies con una toalla y se toma la medida de la masa inicial de cada uno de ellos redondeando al 0,01 g más cercano. Partiendo de ese momento ($t = 0$) se pesan los especímenes en los tiempos $5 \text{ min} \pm 10\text{s}$, $10 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, $15 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, $30 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, $1 \text{ hora} \pm 2 \text{ min}$, $2 \text{ horas} \pm 5 \text{ min}$, $4 \text{ horas} \pm 5 \text{ min}$ y $6 \text{ horas} \pm 5 \text{ min}$. Luego una vez cada 24 horas con una tolerancia de ± 2 horas hasta que el decremento de la masa en función del tiempo muestre un comportamiento asintótico. Se debe calcular la media aritmética de la temperatura y humedad relativa durante el tiempo que dure el proceso de secado.

Finalizado el ensayo se calcula la pérdida de masa acumulada en cualquier tiempo utilizando la ecuación siguiente:

$$\Delta M(t) = (m_i - m_t) \quad \text{Ecuación 23}$$

donde:

$\Delta M(t)$ = la pérdida de masa acumulada en el tiempo t, en gramos,

m_i = masa del espécimen saturado (antes del iniciar el secado), en gramos, y

m_t = masa del espécimen luego del inicio del secado, en el tiempo t, en gramos.

Se calcula luego la pérdida de masa, en porcentaje de la masa del espécimen saturado, en cualquier tiempo t usando la ecuación:

$$\Delta D(t) = \frac{\Delta M(t)}{M} \quad \text{Ecuación 24}$$

donde:

$\Delta D(t)$ = la pérdida de masa acumulada en porcentaje de la masa del espécimen saturado en el tiempo t, en gr/mm²,

$\Delta M(t)$ = la pérdida de masa acumulada en el tiempo t, en gramos, y

M = el valor de la masa inicial, en gramos.

Finalmente se calcula la densidad aparente y seca de los especímenes, la absorción y el volumen de poros en base a la norma ASTM C642-97 (1997), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\text{Densidad seca (g1)} = \frac{A}{C-D} \cdot d \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\text{Densidad saturada superf. seca} = \frac{B}{C-D} \cdot d \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\text{Densidad aparente (g2)} = \frac{A}{A-D} \cdot d \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\text{Volumen poros (\%)} = \frac{g2-g1}{g2} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 29}$$

donde:

A = masa de la muestra seca de estufa, medida en el aire, en gramos,

B = masa de la muestra saturada con la superficie seca, posterior a la inmersión, medida en el aire, en gramos,

C = masa de la muestra saturada y hervida, con la superficie seca, posterior a la inmersión, medida en el aire, en gramos, y

d = es la densidad del agua (1 g/cm³).

4.2.5 Procedimiento de ensayo de adsorción desorción

El objetivo del ensayo es la determinación del contenido de humedad del hormigón a través de la medición del incremento y pérdida de masa del espécimen, por adsorción o desorción respectivamente de humedad del ambiente en función del tiempo, además de las isotermas de sorción que representan la conexión, en estado de equilibrio, entre el porcentaje de humedad en el interior del hormigón y la humedad relativa del ambiente, a temperatura constante. Con los datos obtenidos en el ensayo se podrá determinar además la densidad seca, aparente, el porcentaje de absorción y el volumen de poros.

Se utilizan especímenes de 40 mm x 30 mm x 10 mm, diez por cada tipo de hormigón (B_{CON}, B_{DVR20}, B_{EMV20}). Todos los especímenes son extraídos con una cortadora del interior de probetas de hormigón más grandes, por lo cual, ninguna de sus caras es parte de la superficie original.

Cuando la curva de Δ masa en función del tiempo de los especímenes colocados en la estufa a 40°C se vuelve asintótica, se retiran y cinco especímenes de cada tipo de hormigón se saturan al vacío con el mismo procedimiento descrito en el apartado 4.2.4. y los otros cinco se mantienen en condición seca. Luego se colocan en contenedores de 22 cm de diámetro y 12,5 cm de altura, con diferentes humedades relativas en su interior, previamente preparados. La norma ASTM E104-02 (2012) establece un procedimiento para generar ambientes de humedad relativa (HR) constante en contenedores pequeños. Esto se puede conseguir, preparando en el interior de los contenedores soluciones acuosas saturadas con sales de acuerdo a lo que se especifica en la tabla A1.1 del Anexo A1 de la norma.

Previo a la preparación de las soluciones, se lavaron cinco contenedores con agua destilada. Se preparan entonces en su interior, soluciones acuosas saturadas con LiCl, MgCl₂, NaBr, NaCl y KCl para generar humedades relativas del 11%, 33%, 57%, 75% y 86% respectivamente. Luego se coloca en el fondo de los contenedores un dispositivo de soporte que evite que los especímenes entren en contacto directo con la solución saturada. Se toma el peso inicial de los especímenes, tanto los saturados como los secos y se introducen finalmente en cada contenedor uno seco y uno

saturado de cada tipo de hormigón. Luego se toman los pesos de los especímenes una vez por semana hasta su estabilización, con una balanza de cuatro decimales de precisión, que redondea al 0,0001 g más cercano.

Los especímenes se identificaron con el nombre del hormigón (por ejemplo, B_{CON}), seguido de la letra D para los secos y S para los saturados, y de un número del 1 al 5 de manera tal, que todos los especímenes que se encuentren expuestos a HR 11% estén identificados con el número 1, los que estén a HR 33% con el 2, y así sucesivamente.

Considerándose estables los pesos de los especímenes, se saturan al vacío durante 24 horas y se toma el peso saturado con la superficie seca y el peso sumergido en agua. Finalmente se colocan en la estufa a 100°C durante 24 horas y se toma el peso seco de cada uno de ellos.

A través de las ecuaciones 25 hasta la 29, se determina el porcentaje de absorción, densidad seca, densidad aparente y volumen de poros. Estos valores se determinan de acuerdo a la norma ASTM C642-97 (1997).

Por otro lado, con los valores de contenido de agua (en porcentaje de masa) en función a la humedad relativa del ambiente se obtienen las isotermas de adsorción y desorción que proporcionan información de la estructura porosa del hormigón.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan y analizan los datos y resultados obtenidos de la campaña de ensayos de durabilidad cuya metodología se detalla en el capítulo 4, realizados a los dos hormigones fabricados con los áridos reciclados (B_{DVR20} y B_{EMV20}) y al hormigón control elaborado con áridos naturales (B_{CON}). Inicialmente se presentan los resultados de la densidad, absorción y porosidad de los hormigones obtenidos de los ensayos de absorción de humedad. Posteriormente se muestran y analizan los resultados del ensayo de succión capilar y secado y de adsorción y desorción. Finalmente se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la penetración de cloruros por difusión en los hormigones saturados y de fijación de cloruros en cada uno de ellos.

5.1 Contenido inicial de cloruros total

De acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 4.2.1 se determinaron los cloruros solubles en ácido o lo que es lo mismo, los cloruros totales que tenían las probetas de cada tipo de hormigón al inicio de los ensayos. La Tabla 2 muestra los valores del porcentaje de cloruros obtenido por peso de muestra.

Tabla 2. Contenido inicial de cloruros totales en % del peso

| ID del hormigón | Peso de muestra (g) | %Cl |
|-----------------------------|----------------------------|------------|
| B _{CON} /0.4-1 | 5.0834 | 0.02 |
| B _{DVR20} /0.4-1 | 5.0365 | 0.02 |
| B _{EMV20} /0.4-1.7 | 5.0804 | 0.02 |

5.2 Densidad, absorción y porosidad

En la Figura 11 y Figura 12 se muestran los resultados obtenidos de la densidad seca y densidad aparente respectivamente. Los valores mostrados, tanto de la densidad seca como la densidad aparente, son el resultado de la media aritmética de los obtenidos de cada uno de los especímenes de cada tipo de hormigón. Estos valores individuales se obtuvieron por las ecuaciones indicadas en los apartados 4.2.4 y 4.2.5.

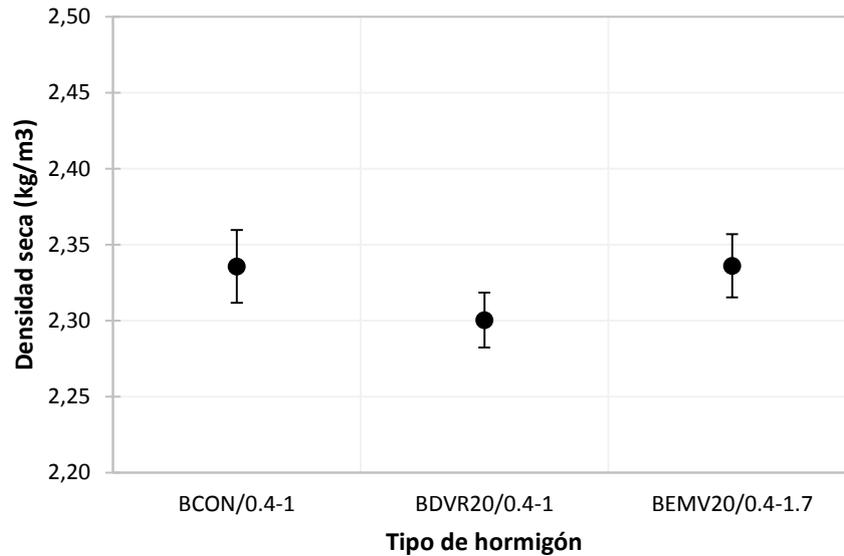


Figura 11. Densidad seca de los hormigones endurecidos

En la Figura 11 se observan ligeras diferencias en la densidad seca entre los tres tipos de hormigón, siendo 1,5% menor en el hormigón con áridos reciclados BDVR20 con relación a los otros dos hormigones. El promedio de los valores del hormigón BCON y BEMV20 son prácticamente iguales, aunque la desviación estándar es un poco mayor en el BCON, siendo este último, el que presenta los valores máximos absolutos mayores.

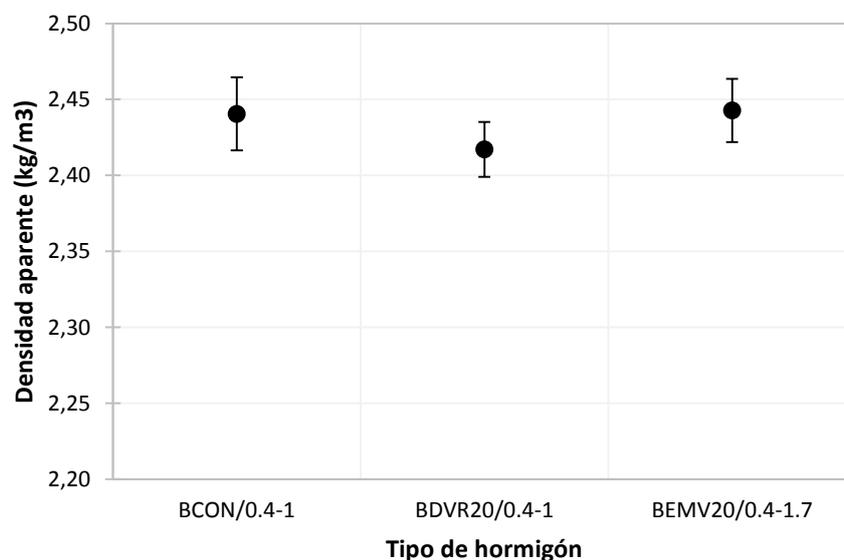


Figura 12. Densidad aparente de los hormigones endurecidos

En la Figura 12 (densidad aparente) se observa el mismo comportamiento que para la densidad seca con el hormigón con árido reciclado B_{DVR20} con el valor más pequeño con un 1% de diferencia en relación con los otros dos hormigones que presentan valores prácticamente iguales entre ellos. El B_{CON} es igualmente el que tiene los valores máximos absolutos mayores. La disminución de la densidad en el hormigón B_{DVR20} se atribuye a que la densidad del mortero adherido es inferior a la de los áridos convencionales. El exceso de mortero en los áridos de este hormigón provoca que su densidad sea ligeramente inferior al B_{EMV20} que no presenta esta característica debido al balance de mortero total que sugiere el método.

Por otro lado, el hecho de que la diferencia de densidad entre el B_{DVR20} y los otros dos hormigones sea pequeña es coincidente con resultados obtenidos en otros estudios y la Instrucción EHE-08, en los cuales se advierte que el descenso en la densidad es prácticamente imperceptible cuando la sustitución del árido grueso convencional por el reciclado es inferior al 20%. En sustituciones del 50% la densidad sufre una reducción media del 2%, y en sustituciones del 100% una disminución media del 3,5% (Sánchez & Alaejos, 2009).

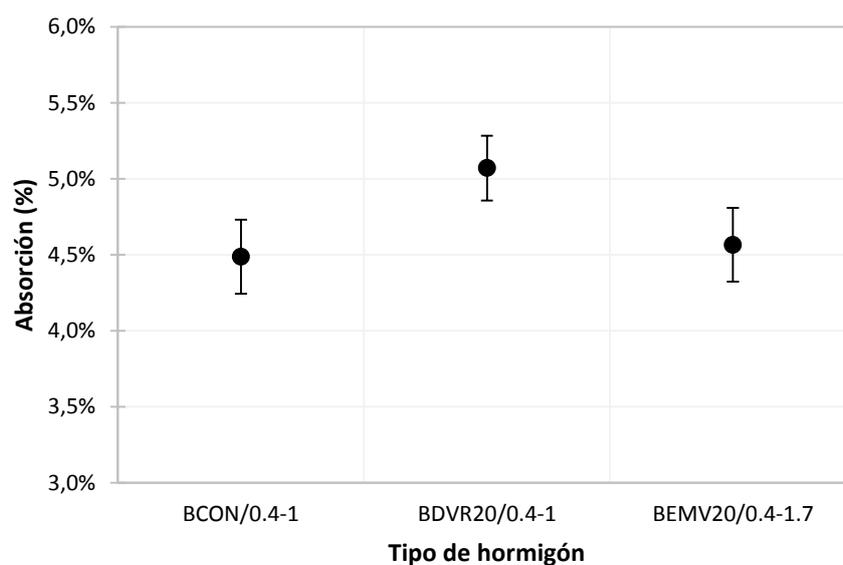


Figura 13. Absorción de los hormigones. Porcentaje en relación al peso seco

La absorción del hormigón con áridos reciclados B_{DVR20} , como se muestra en la Figura 13, es significativamente mayor que la de los hormigones B_{CON} y B_{EMV20} , lo que es de esperarse ya que el mortero adherido en los áridos crea un sistema más poroso en comparación con los otros dos hormigones. Por la misma razón, el hormigón B_{EMV20} tiene una absorción ligeramente mayor que el fabricado con áridos naturales que no tienen mortero adherido, aunque la diferencia es muy pequeña.

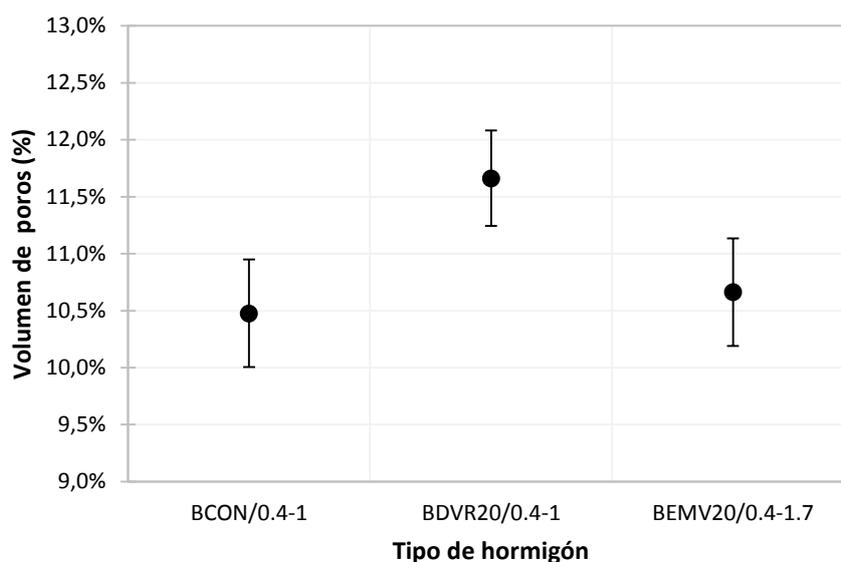


Figura 14. Volumen de poros de cada tipo de hormigón

De igual forma, el volumen de poros es mayor en el hormigón B_{DVR20} , lo cual es congruente con los valores de densidad y absorción, ya que, un sistema más poroso tiene repercusión en la densidad, con tendencia a disminuirla, porque hay más espacios vacíos en la matriz cementicia. Lo mismo ocurre para la absorción, que incrementa como consecuencia de un volumen de poros mayor debido a los áridos reciclados. El aspecto que juega un papel fundamental en la diferencia de resultados entre el hormigón B_{DVR20} y B_{EMV20} es, como se mencionó, el método de dosificación utilizado que influye en la cantidad de mortero que contienen.

Por otro lado, al igual que ocurre con la densidad, el hormigón B_{EMV20} muestra diferencias mínimas en la porosidad en relación con el B_{CON} . Ante diferencias tan pequeñas en la porosidad, los valores de densidad pueden estar gobernados por otros factores, como la cantidad de áridos. Por ejemplo, como se muestra en la Tabla 1, la suma de peso en los áridos del hormigón B_{EMV20} es mayor que en el convencional, con 1888 kg y 1866 kg respectivamente. El peso de la fracción gruesa es igualmente mayor en el hormigón B_{EMV20} , con un valor de 1114 kg frente a 1031 kg del hormigón convencional. A medida se incrementa la cantidad de áridos, especialmente los gruesos, incrementará la densidad del hormigón (González, Barra, & Valls, 2012).

5.3 Absorción de agua por succión capilar y pérdida por secado

5.3.1 Succión capilar

Como se explicó en el apartado 4.2.4.1, dos especímenes de cada hormigón fueron sumergidos en agua (una sola cara a 3 mm de profundidad desde la superficie) con la intención de medir, por succión capilar de agua, el incremento de masa por unidad de área en relación al tiempo. El comportamiento de cada tipo de hormigón mostrado desde la Figura 15 hasta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es la media aritmética del $\Delta M/\text{área}$ de los dos especímenes.

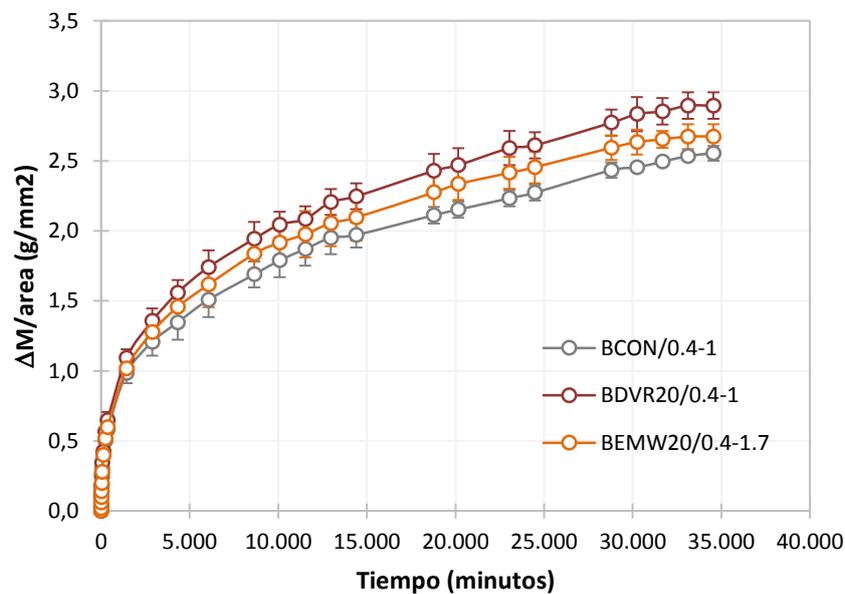


Figura 15. Incremento de la masa por unidad de área para cada tipo de hormigón, en relación al tiempo total de duración del ensayo

Como se muestra en la Figura 15, el hormigón que absorbe más agua es el B_{DVR20} , seguido del B_{EMV20} . Este resultado es congruente con los obtenidos y lo analizado en el apartado anterior. El volumen de poros es mayor en el hormigón reciclado diseñado por el método de reemplazo directo (método clásico Bolomey) por lo cual, su absorción es mayor que la del diseñado por el volumen de mortero equivalente, cuyo valor es más cercano al del hormigón convencional.

El valor de $\Delta M/\text{área}$ del hormigón B_{DVR20} fue un 7,21% mayor que el del B_{EMV20} a los 14.000 minutos, diferencia que ascendió al 8,26% al final del ensayo. El valor del $\Delta M/\text{área}$ del hormigón B_{EMV20} este punto fue superior al del hormigón convencional en un 4,67%, lo que confirma que la diferencia del comportamiento entre estos dos hormigones es menor que la que hay entre los dos hormigones reciclados.

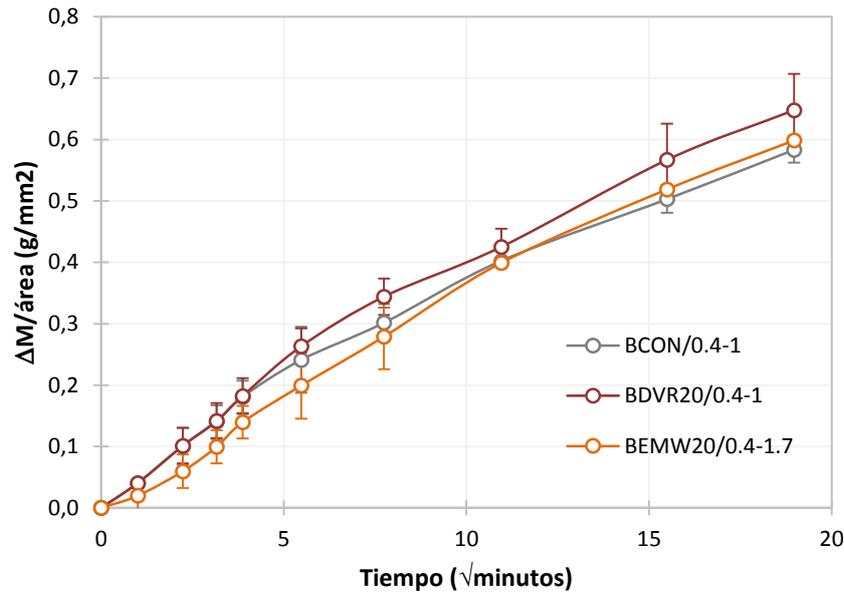


Figura 16. Incremento de la masa por unidad de área de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo para las primeras 6 horas del ensayo

Como se explicó en el apartado 4.2.4, la pendiente de las rectas que mejor se ajustan a las curvas de $\Delta M/\text{área}$ en relación con la raíz cuadrada del tiempo define la velocidad de absorción (absortividad o succión capilar) de cada hormigón. La Figura 16 muestra estas curvas, en donde se distingue que el hormigón B_{DVR20} es el que tiene el mayor ritmo de absorción en las primeras 6 horas, seguido del hormigón B_{CON} y el B_{EMV20} con comportamientos muy similares. En la Tabla 3 se sintetizan estos resultados mediante las ecuaciones de las rectas que se ajustan a la curva de succión capilar de cada hormigón, donde se ve que el ritmo de absorción del hormigón B_{EMV20} es menor que el convencional en las primeras 6 horas, hecho que a priori no parece ser lógico. Sin embargo, esto puede deberse a que los hormigones con estructuras porosas más finas (en este caso el B_{CON}) experimentarán mayores presiones de succión capilar, lo que generará una mayor absorción inicial. No obstante, este efecto es reducido por la restricción del flujo de agua debido a la baja permeabilidad general (Claisse, 2016), como de hecho, se ve que ocurre ya que las curvas se intersectan a las 2 horas de iniciado el ensayo.

Aunque con ligeras diferencias, el comportamiento de estos dos hormigones es muy similar, y se distancian del B_{DVR20} que tiene un ritmo de absorción inicial mayor debido a la porosidad que produce el exceso de mortero en la matriz cementicia proveniente de los áridos.

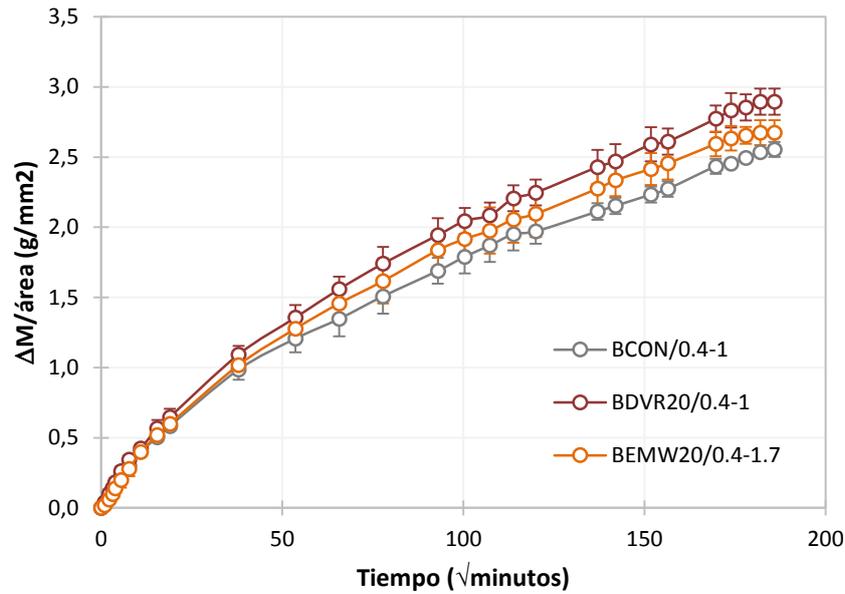


Figura 17. Incremento de la masa por unidad de área de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo total del ensayo

La figura 17 por su parte, muestra las curvas $\Delta M/\text{área}$ para el tiempo total de duración del ensayo, donde se puede observar la absorptividad inicial y la secundaria. En esta última, el hormigón B_{DVR20} continúa teniendo el ritmo de absorción mayor como se observa en la Tabla 3, seguido del hormigón reciclado B_{EMV20} y finalmente el hormigón convencional debido a su baja permeabilidad general.

En la ecuación de la recta que se ajusta a la curva $\Delta M/\text{área}$ en relación a la raíz cuadrada del tiempo, cuya forma es $y = mx + n$, el valor de m corresponde a la pendiente de la misma, que en este caso representa el ritmo de succión capilar o absorptividad como ya se mencionó. En la Tabla 3 se agrupan los valores de las pendientes para la absorción inicial y secundaria de cada uno de los hormigones estudiados.

Tabla 3. Succión capilar inicial de cada tipo de hormigón

| ID del hormigón | Succión capilar inicial (mm) | Succión capilar secundaria (mm) |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------|
| $B_{CON}/0.4-1$ | 0.0337 | 0.0099 |
| $B_{DVR20}/0.4-1$ | 0.0372 | 0.0114 |
| $B_{EMV20}/0.4-1.7$ | 0.0333 | 0.0104 |

5.3.2 Secado

De acuerdo a lo comentado en el apartado 4.2.4.2, los especímenes saturados se colocaron en una cámara en condiciones de temperatura y humedad controladas. La temperatura promedio fue de 23°C y la humedad relativa 55%. La pérdida de masa dividida por la masa inicial en relación al tiempo se muestra en la Figura 18 donde se observa que el hormigón con áridos reciclados diseñado por el método de reemplazo directo pierde más cantidad de agua que el hormigón con áridos naturales y el reciclado por el método de volumen de mortero equivalente, siendo este último el que menos pierde. Esto está vinculado no solamente al tamaño y cantidad de poros, sino a la tortuosidad y grado de interconexión de la estructura porosa que permite que el agua salga más fácilmente del interior.

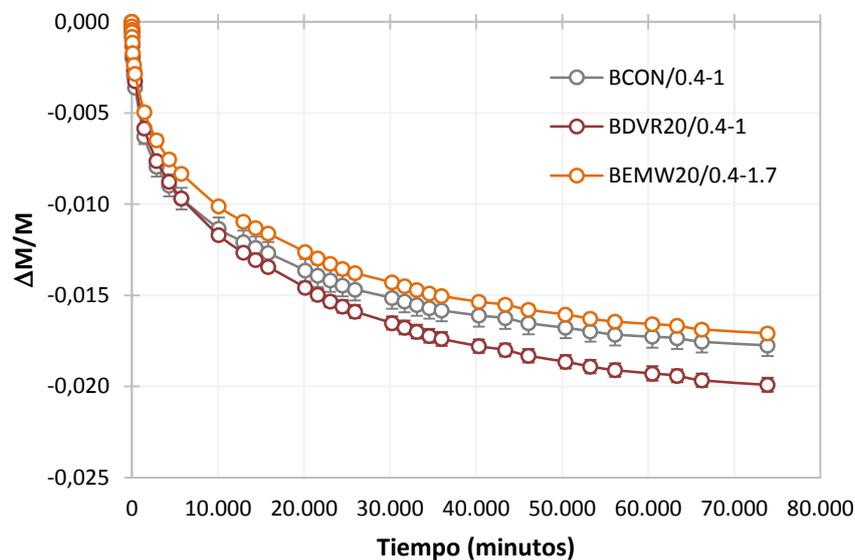


Figura 18. Pérdida de masa para cada tipo de hormigón, en relación al tiempo total de duración del ensayo

En la Figura 19 por ejemplo, se muestra que el ritmo de pérdida de agua tiene un comportamiento diferente en las primeras horas en comparación con el ritmo de pérdida secundario mostrado en la Figura 20. Esto puede deberse, como se mencionó, a la tortuosidad del sistema de poros, al tamaño y cantidad de poros. El hormigón convencional pierde agua más rápido en las primeras horas, seguido del B_{DVR}20 y el B_{EMV}20, sin embargo, a largo plazo el hormigón reciclado por el método de reemplazo directo pierde agua a un ritmo superior que el hormigón convencional y el reciclado por el método del volumen de mortero equivalente, que vuelven a mostrar entre ellos un ritmo similar de pérdida de agua secundaria.

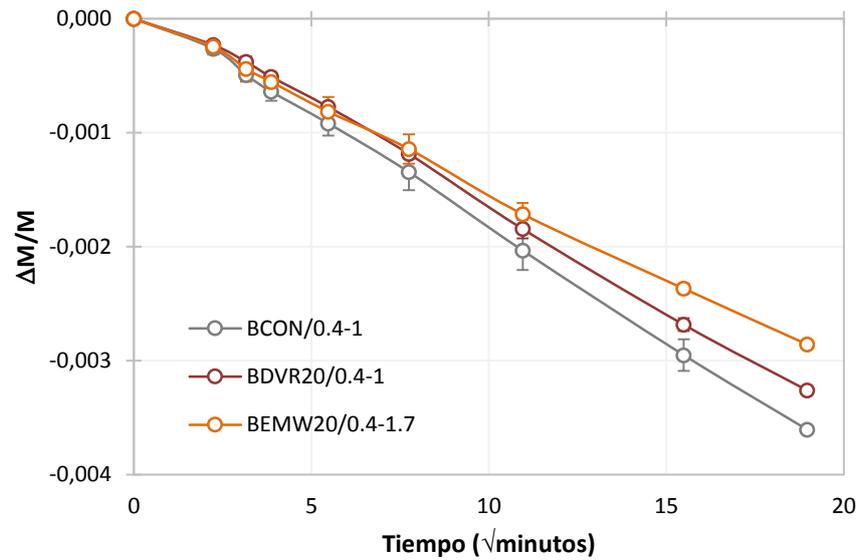


Figura 19. Pérdida de masa de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo para las primeras 6 horas del ensayo

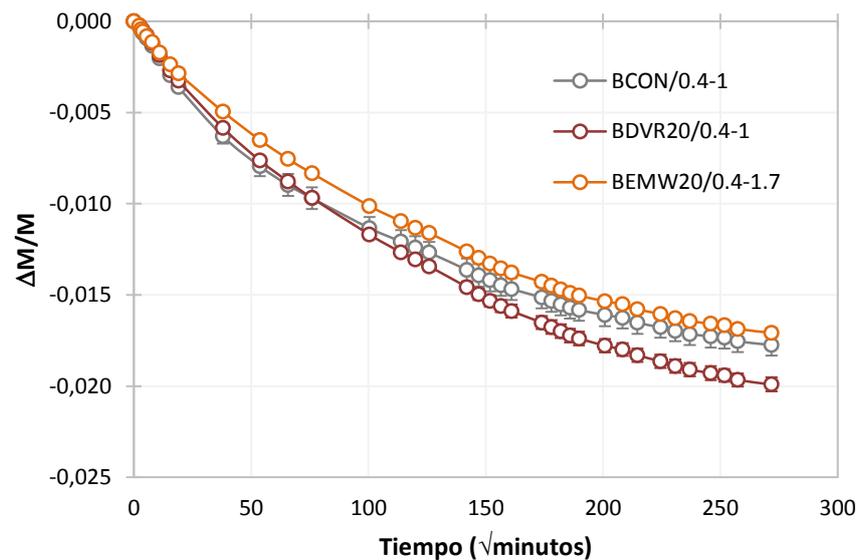


Figura 20. Pérdida de masa de cada tipo de hormigón entre la raíz del tiempo total del ensayo

5.4 Adsorción y desorción

El término adsorción se utiliza para sugerir la condensación de gases sobre la superficie del hormigón. El término también engloba la condensación capilar, que es la fase final del proceso de adsorción del gas.

Cuando un sólido o material poroso como el hormigón está expuesto a una cierta humedad relativa, este comienza a adsorber vapor de agua hasta que alcanza un estado de equilibrio con el ambiente, es decir, la humedad relativa y la temperatura en los poros son prácticamente iguales a los del ambiente. El material poroso por lo tanto, intercambiará agua con el medio en el que está, hasta que se alcance un punto de equilibrio. Cuando el material es expuesto a una humedad relativa en un contenedor cerrado, como es el caso del ensayo que se está llevando a cabo, el hormigón experimentará un incremento en su masa y una disminución de la presión del vapor de agua contenido dentro del recipiente. El equilibrio se alcanza cuando la presión y el peso adquieren valores estables. La humedad relativa es la relación entre la presión del vapor dentro del contenedor y la presión máxima de saturación.

La adsorción se produce por fuerzas de interacción físicas y químicas entre el sólido y el gas. La adsorción física ocurre por fuerzas de tipo Van der Waals, mientras que la química ocurre básicamente por enlaces químicos. La cantidad de vapor de agua adsorbido dependerá fundamentalmente de la temperatura, la presión en el contenedor (o humedad relativa) y las propiedades del hormigón (Kielsgaard, 1986).

En la Figura 21 se presentan los cambios de masa en porcentaje, en relación con el tiempo, para los especímenes del hormigón convencional expuestos a diversas humedades relativas. Se puede observar que el estado estacionario o de equilibrio se alcanza mucho más rápido a humedades relativas más bajas (claramente apreciable en 11%, 33% y 57%).

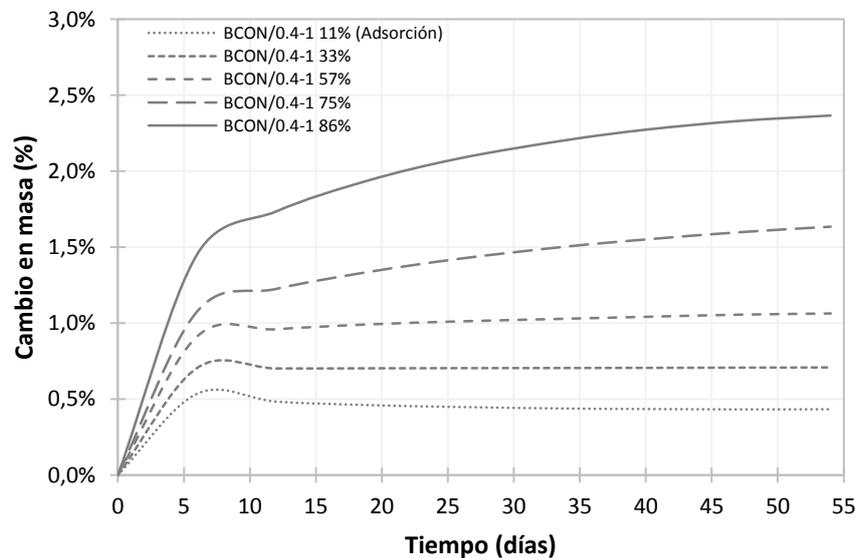


Figura 21. Curvas de incremento de masa en relación con el tiempo para el hormigón convencional a distintas humedades relativas

A humedades relativas de 75% y 86% no parece alcanzarse el equilibrio en el sistema en el tiempo máximo de duración del ensayo, sin embargo, el peso se tomaba en una balanza de 4 cifras decimales y las variaciones en las últimas mediciones sólo implicaban al último decimal, por lo cual, con la metodología utilizada, el valor del cambio de masa para estos especímenes también se puede considerar estable.

En la Figura 22 se muestran los valores de incremento de masa respecto al tiempo para el hormigón B_{DVR20} . Se observa que hay una tendencia a alcanzarse el equilibrio más rápidamente en las tres humedades relativas más bajas. Comparando con las curvas obtenidas en el hormigón convencional, se observa que a HR 11% el hormigón reciclado adquiere un incremento en la masa de 0,5% hasta llegar a un estado estacionario, mientras que en el hormigón convencional es ligeramente menor. A HR 33% el B_{DVR20} alcanza el equilibrio cuando su masa ha incrementado un 0,82%, mientras que el B_{CON} lo hace un 0,71%. Lo mismo ocurre para todos los valores de humedad relativa.

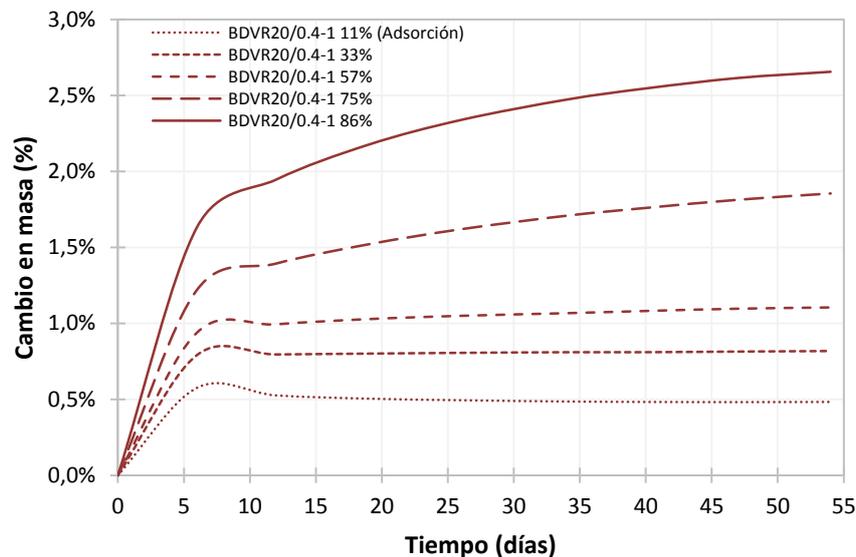


Figura 22. Curvas de incremento de masa en relación con el tiempo para el hormigón B_{DVR20} a distintas humedades relativas

Las curvas de incremento de masa del hormigón B_{EMV20} mostradas en la Figura 23 muestran el mismo comportamiento de equilibrio en las HR 11%, 33% y 57%. Para todos los hormigones, el estado estacionario con estas humedades relativas se alcanzó prácticamente al mismo tiempo (a los 12 días). Por otra parte, en este tipo de hormigón (B_{EMV20}) los cambios en la masa para cada valor de humedad relativa son muy similares a los del hormigón convencional e inferiores para todos los casos con el hormigón reciclado B_{DVR20} .

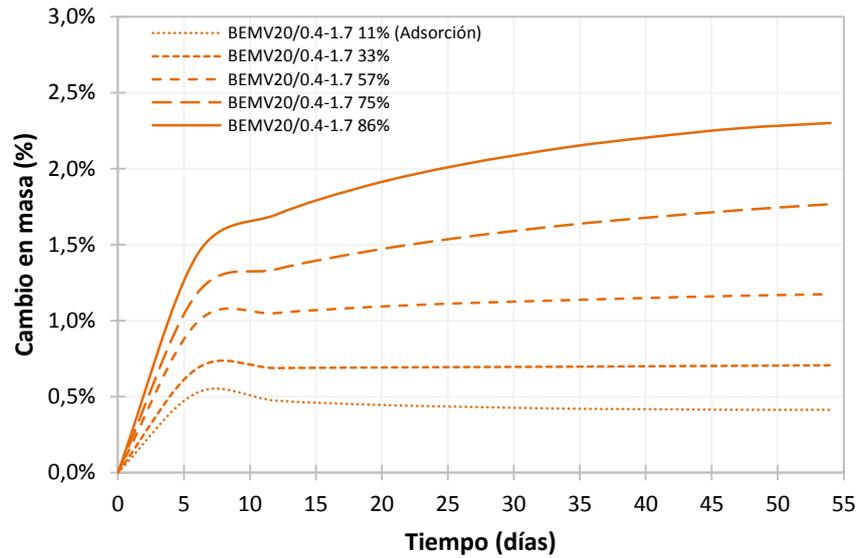


Figura 23. Curvas de incremento de masa en relación con el tiempo para el hormigón BEMV20 a distintas humedades relativas

En las figuras siguientes se presentan las curvas de desorción de las probetas inicialmente saturadas al vacío.

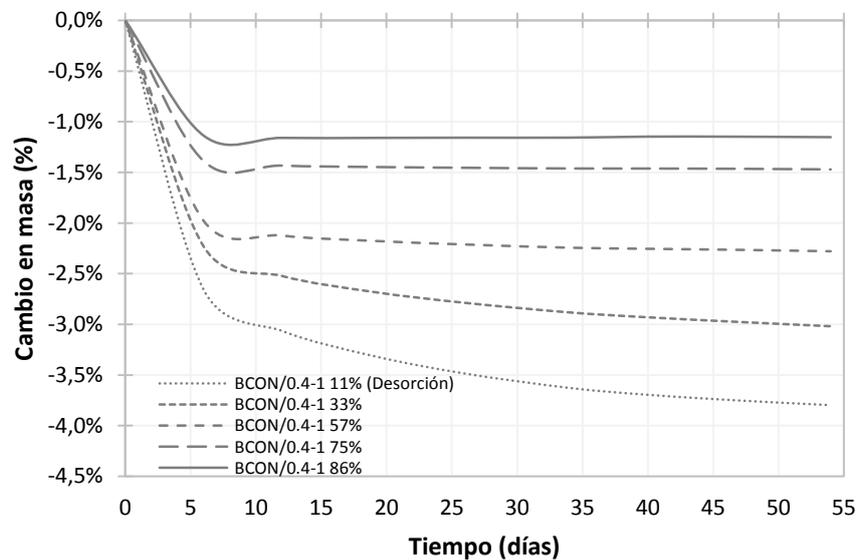


Figura 24. Curvas de pérdida de masa en relación con el tiempo para el hormigón convencional a distintas humedades relativas

La Figura 24 muestra la pérdida de masa en relación con el tiempo para el hormigón convencional. En este caso se observa un comportamiento similar al de las curvas de incremento de masa, pero inverso, y con la diferencia de que los especímenes que

alcanzan el equilibrio más rápido son los que se encuentran expuestos a humedades relativas más altas (HR 86%, HR 75% y HR 57%). Esto se debe a que están saturados inicialmente y presentan diferencias menores con la humedad relativa en el interior del contenedor.

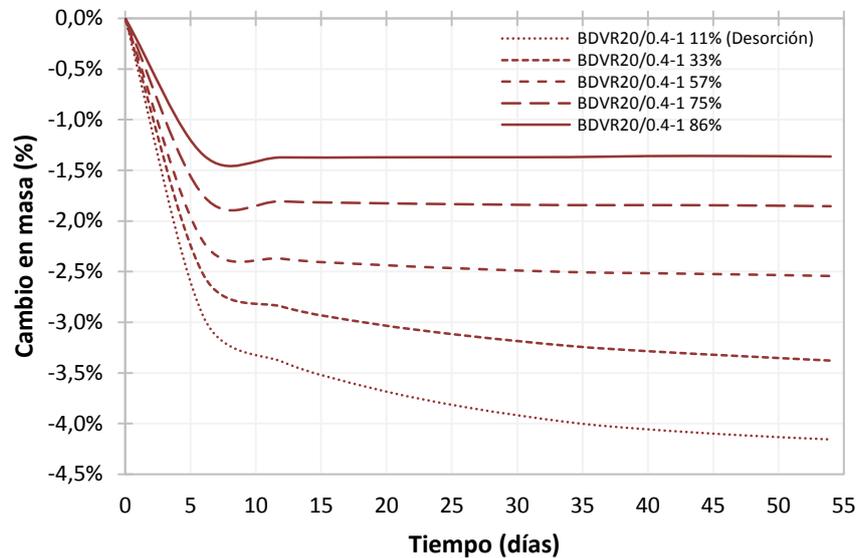


Figura 25. Curvas de pérdida de masa en relación con el tiempo para el hormigón B_{DVR20} a distintas humedades relativas

En la Figura 25 se muestran las curvas de desorción del hormigón reciclado B_{DVR20} . Se observan mayores cambios de masa en el tiempo para todas las humedades relativas, en comparación con el hormigón B_{CON} y B_{EMV20} , lo que es congruente con resultados obtenidos en el ensayo de secado mostrados en el apartado 5.3.2 y significa que tiene una tendencia a perder agua más rápidamente. Este hecho puede atribuirse al mortero adherido a los áridos y por consiguiente, a la cantidad de mortero en la matriz de este tipo de hormigón que repercute en el volumen de poros.

El hormigón con áridos reciclados por el método del volumen de mortero equivalente por su parte, muestra (Figura 26) un comportamiento incluso mejor que el del hormigón convencional a ciertas humedades relativas (HR 11% y HR 57%). En los otros valores de humedades relativas, como es de esperarse, el hormigón convencional es el que tiene menores pérdidas de agua en el tiempo, sin embargo, el B_{EMV20} presenta valores muy cercanos. El comportamiento de estos dos hormigones se distancian del B_{DVR20} , que mantiene los mayores cambios de masa en el tiempo en procesos de intercambio de humedad con el ambiente.

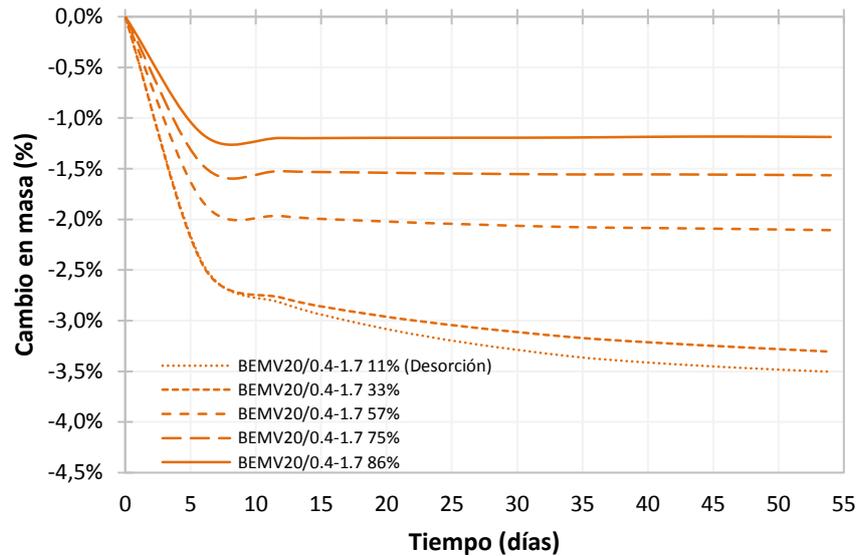


Figura 26. Curvas de pérdida de masa en relación con el tiempo para el hormigón B_{EMV}20 a distintas humedades relativas

En las figuras siguientes se presentan las isotermas de sorción, que representan la conexión entre el contenido de agua en el interior del hormigón y la humedad relativa del ambiente. Existen en la literatura miles de isotermas de adsorción obtenidas de una amplia diversidad de gases, vapores y sólidos porosos, sin embargo, la mayoría de ellas pueden agruparse en clases enumeradas del I al VI (Brunauer, Emmet, & Teller, 1938). La clase más común para la fijación de humedad en los materiales de construcción porosos es la tipo II, que en equilibrio tiene forma de S como se muestra en la Figura 27.

En ambientes de baja humedad relativa, la forma es cóncava respecto al eje de porcentaje de humedad. En este tramo curvo, las moléculas de agua están unidas en una capa a la superficie de los poros por medio de las fuerzas de Van de Waals. El punto donde comienza la sección cuasilínea de la isoterma, indica que se ha completado la formación de esta capa monomolecular y empieza la formación de más capas de moléculas. Luego de esta sección recta (a humedades relativas altas), tiene lugar la condensación capilar, cuya forma es convexa respecto al eje del porcentaje de humedad (Kielsgaard, 1986). La condensación capilar ocurre cuando las capas de moléculas son lo suficientemente gruesas para llenar completamente el poro. Esta etapa final permite determinar la distribución del tamaño de los poros en el hormigón.

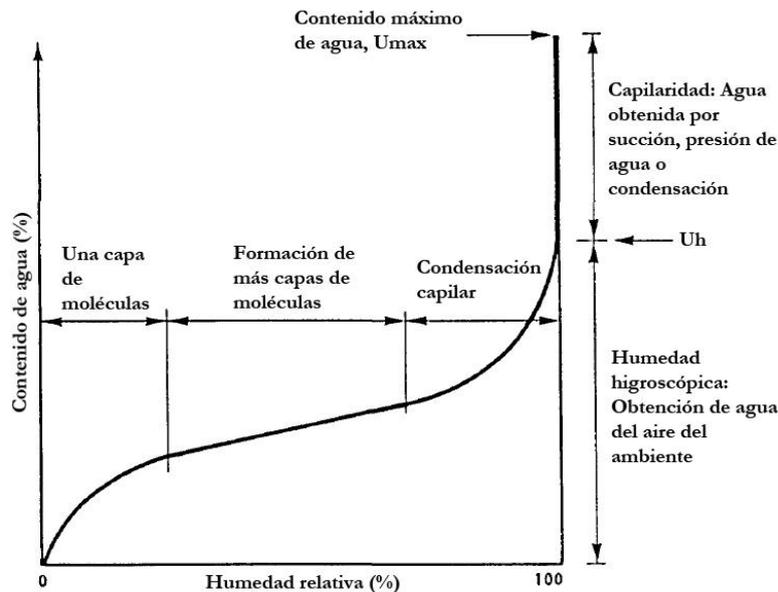


Figura 27. Forma típica de una isoterma de sorción de tipo II, adaptado de Kielsgaard (1986)

El contenido máximo de humedad higroscópica en un material poroso, como se observa en la Figura 27, es significativamente menor que el contenido de humedad que dicho material puede ganar por succión capilar.

Si el mismo hormigón en condición inicial saturada, es sometido a un proceso de desorción hasta llegar al equilibrio, se obtiene una isoterma de desorción que siempre está por encima de la isoterma de adsorción, es decir, el ciclo adsorción – desorción no es reversible. Este fenómeno, llamado histéresis, forma un lazo entre las isotermas de adsorción y desorción como se muestra en la Figura 28, Figura 29 y Figura 30. Los factores que pueden provocar la histéresis y repercuten en el ancho del lazo son:

- El efecto cuello de botella, que se ocasiona cuando la conexión entre poros grandes, es a través de poros más pequeños. Los poros pequeños producen un efecto de bloqueo durante la evaporación capilar que le impide al agua de los poros grandes salir hasta que los pequeños están completamente vacíos. Cuanto mayor sea el bloqueo en la estructura porosa, mayor será el lazo de histéresis. Además, en estructuras porosas altamente interconectadas es típico observar un lazo de histéresis de forma asimétrica y más ancho. Este factor junto con la geometría de los poros, son los principales responsables de la aparición de este fenómeno (Naumov, 2009).
- La geometría de los poros, cuya importancia radica en que repercute en las presiones de condensación capilar y evaporación. Por ejemplo, si se considera un poro cilíndrico sólo accesible en uno de sus extremos, se forma un menisco semiesférico tanto para la etapa de adsorción como para la de evaporación, por lo que ambas etapas ocurrirán a la misma presión relativa y las ramas de

las isothermas de absorción y desorción serían iguales y no ocurriría la histéresis. Luego, si se considera que el poro cilíndrico es accesible por ambos extremos, por su geometría, la adsorción tiene lugar con la formación de un menisco cilíndricamente cóncavo en la interfase líquido – vapor, debido a la capa adsorbida en las paredes del poro, mientras que la evaporación ocurrirá en los extremos del poro y aparecerán meniscos semiesféricos. Esta diferencia hará que la evaporación se produzca a una presión menor que la condensación y se forme el lazo de histéresis.

- Los cambios en el ángulo de contacto de las interfases sólido-líquido, es decir, el ángulo entre la superficie del menisco en contacto con la pared del poro y la superficie de la pared, lo que provocará que el agua avance y retroceda erráticamente.
- Cambios químicos o físicos en el sistema de poros debido al agua presente.

En la Figura 28 se presentan las isothermas de adsorción y desorción del hormigón control elaborado con áridos naturales. La isoterma de desorción, como es fácilmente apreciable, se encuentra desplazada hacia arriba en relación con la de adsorción, debido a que la evaporación se produjo a presiones menores que la condensación. Por ejemplo, el hormigón adsorbe un 2% de agua respecto a su masa total a una humedad relativa de 83% aproximadamente, sin embargo, por desorción mantiene un contenido de agua del 2,8% a la misma humedad relativa. Este ciclo de histéresis se debe, como se mencionó anteriormente, a la estructura y forma de los poros. Si mayor cantidad de poros son accesible por ambos extremos, generan el efecto cuello de botella, o bien, mientras mayor sea el grado de interconexión de la red porosa, el ciclo de histéresis será más ancho y asimétrico.

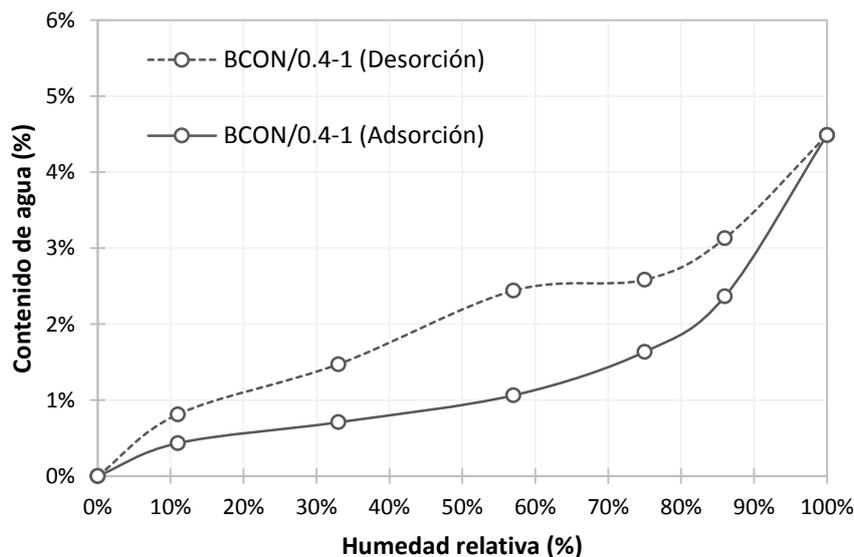


Figura 28. Isothermas de sorción del hormigón control con áridos naturales

El lazo de histéresis entre las isothermas del hormigón reciclado mostradas en la Figura 29 es ligeramente más ancho y asimétrico que la del hormigón convencional, lo que permite deducir que en el hormigón B_{DVR20} hay una mayor cantidad de poros accesibles en ambos extremos, provocado probablemente por una red porosa con un mayor grado de interconexión y un mayor efecto de bloqueo por la distribución del tamaño de sus poros. Estas características pueden atribuirse al exceso de mortero que presenta este tipo de hormigón. Por otro lado, en este hormigón, se puede observar que existe un mayor porcentaje de agua adsorbida para cada valor de humedad relativa en comparación con el hormigón convencional. Además, tanto para la adsorción como para la desorción, la diferencia del contenido de agua entre las humedades relativas 86% y 11% es mayor que la del hormigón convencional. Ambos hechos sugieren que el hormigón reciclado tiene una predisposición a ganar o a perder más agua en el intercambio de humedad con el ambiente.

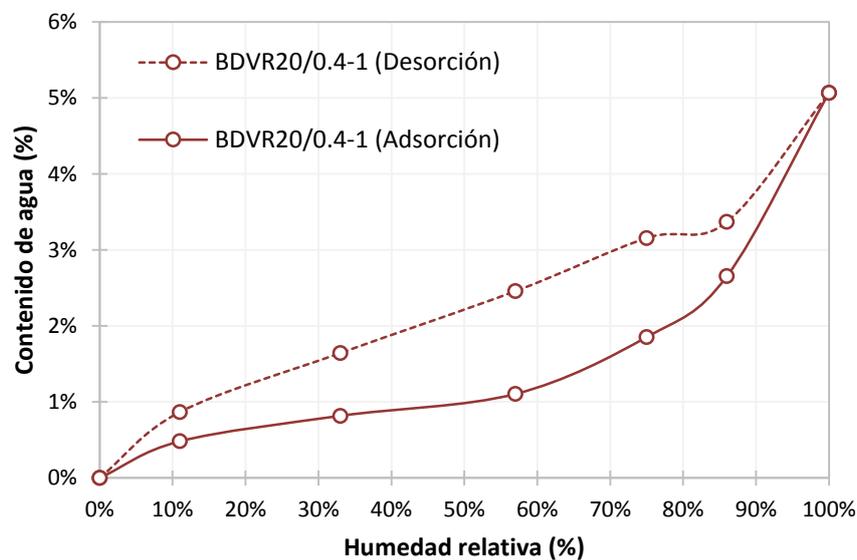


Figura 29. Isothermas de sorción del hormigón reciclado por el método de reemplazo directo

La Figura 30 por su parte, muestra las isothermas obtenidas para el hormigón B_{EMV20} , en la cual se puede observar un lazo de histéresis más estrecho y unos porcentajes de contenido de agua para cada valor de humedad relativa muy similares a los del hormigón convencional, lo que indica que tienen estructuras porosas y un volumen de poros similar, lo que coincide con los resultados obtenidos en el apartado 5.2. Se puede intuir por el lazo de histéresis que el grado de interconexión entre los poros del hormigón B_{EMV20} es menor que el del B_{DVR20} , ya que, aunque otro factor que influye en el ancho de este lazo es el efecto de bloqueo en los poros, la pérdida de agua en relación al tiempo es mayor en el hormigón B_{DVR20} , lo que indica que el grado de interconexión de sus poros es mayor.

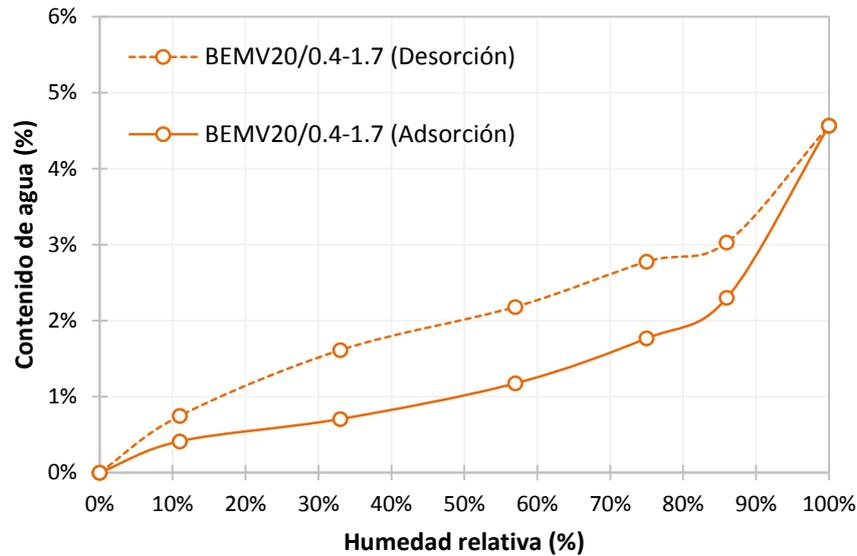


Figura 30. Isotermas de sorción del hormigón reciclado por el método del volumen de mortero equivalente

Si se toma en cuenta que el ensayo tuvo el mismo tiempo de duración para los tres hormigones, y que el hormigón reciclado B_{DVR}20 tiene los mayores cambios de masa para cada valor de humedad relativa, se puede deducir que este gana y pierde agua más rápidamente que los otros dos tipos de hormigón. Este resultado es congruente por ejemplo, con las curvas de secado mostradas en la sección 5.3.2.

La histéresis es un fenómeno de corto plazo que responde a una condición de inestabilidad termodinámica y va disminuyendo, hasta desaparecer luego de un cierto período de tiempo.

5.5 Fijación de cloruros

Una vez iniciado el ensayo se llevaron a cabo mediciones de pH y conductividad periódicas de cada una de las muestras con la intención de ver la evolución en el tiempo de sus valores. Puesto que se prepararon dos muestras idénticas de cada tipo de hormigón y cada molaridad, los resultados obtenidos son el valor de la media aritmética de estas.

Como se ha mencionado, la composición de la solución porosa es decisiva en la capacidad de fijación de cloruros. La presencia de iones como los hidróxidos y por consiguiente, el pH, tienen un efecto importante puesto que estos iones compiten con los cloruros por los lugares o espacios de fijación. Niveles de pH más bajos incrementan la capacidad de fijación, efecto especialmente evidente a bajas concentraciones de cloruros (Ipavec, Vuk, Gabrovšek, & Kaučič, 2013).

El propósito principal de realizar un seguimiento a los valores de pH era qué, debido a la influencia que tienen en la capacidad de fijación, se hace necesario esperar a que los mismos se estabilicen para cuantificar los cloruros fijados en cada una de las muestras. La Figura 31 hasta la Figura 34 muestran la evolución de los valores de pH en el tiempo para cada tipo de hormigón y cada molaridad inicial. Se puede observar que los valores de pH tienden a bajar ligeramente a medida aumenta la concentración de cloruros. Estos se estabilizan en valores cercanos a 12,65 en las soluciones de 0,03125M y a 12,33 en las soluciones de 2,0M. Como todas las muestras se hicieron por duplicado, se calculó la desviación estándar, siendo 0,33% el coeficiente de variación mayor, en el universo de muestras.

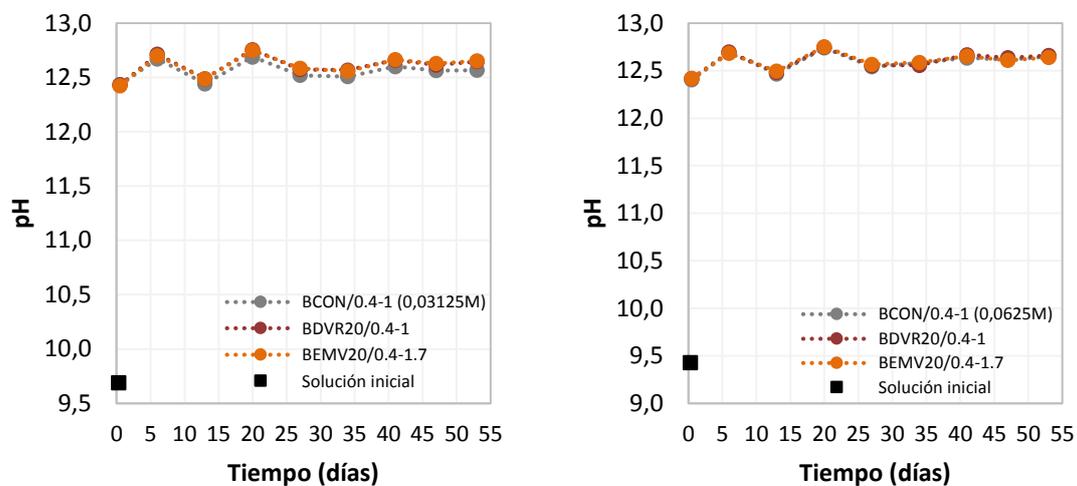


Figura 31. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 0,03125M (izquierda) y en solución de 0,0625M (derecha)

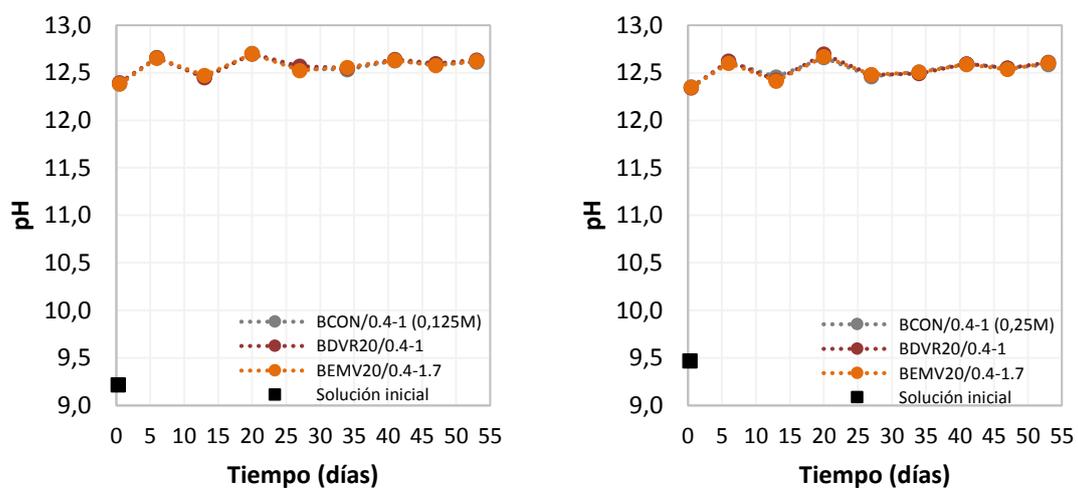


Figura 32. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 0,125M (izquierda) y en solución de 0,25M (derecha)

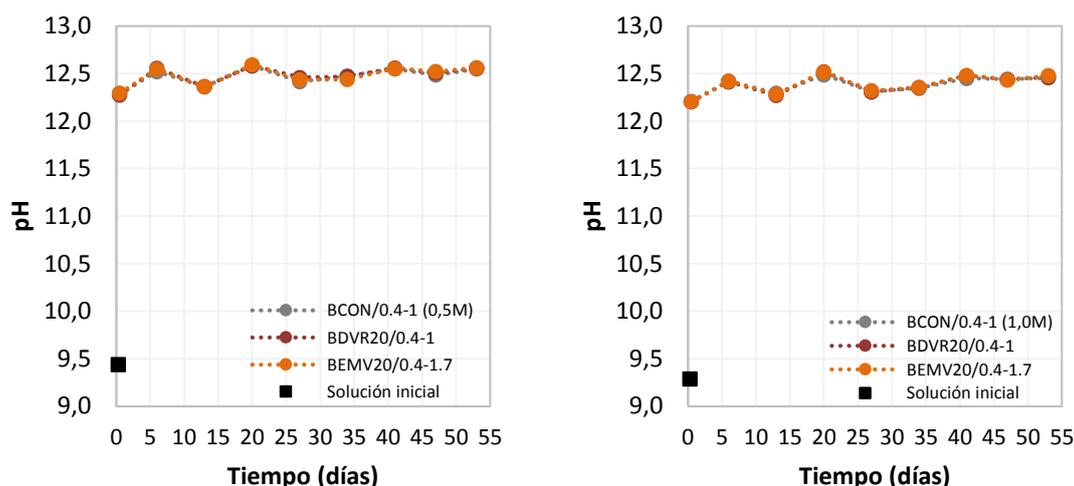


Figura 33. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 0,5M (izquierda) y en solución de 1,0M (derecha)

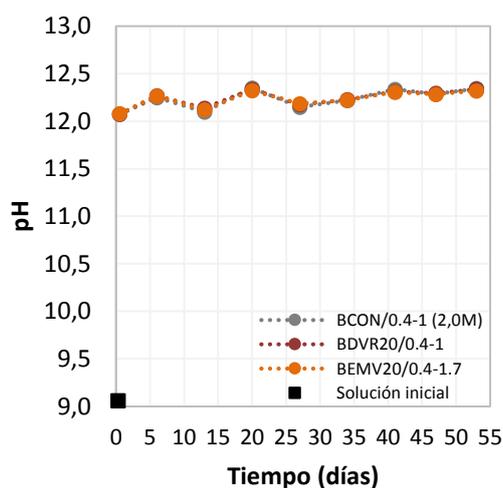


Figura 34. Valores del pH en el tiempo para las muestras en solución de 2,0M

La conductividad es una medida de la capacidad de la disolución de conducir corriente eléctrica. La conductividad específica es el parámetro utilizado para medir la conductividad y su unidad es el Siemens/centímetro, pudiendo también ser los submúltiplos microSiemens ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o miliSiemens (mS/cm). Los iones cloruro son responsables de la conductividad de la solución. Una conductividad elevada indica que hay un contenido elevado de minerales sólidos disueltos, por lo cual, en este caso una conductividad elevada indica unas concentraciones elevadas de cloruros libres en la solución. Al igual que para el pH, se realiza la medición de la conductividad en las soluciones hasta su estabilización, ya que esta indica que las muestras han fijado una cierta cantidad de cloruros y el sistema está estable, es decir, a partir de ese momento

no ocurrirán cambios importantes en los valores de cloruros fijos y libres. Desde la Figura 35 a la Figura 38 se muestran los valores de la conductividad para las muestras de cada tipo de hormigón y molaridad inicial. Los valores de la conductividad (en mS/cm) tienden a incrementar a medida incrementa la concentración de cloruros en la solución, lo que confirma lo comentado anteriormente. Los valores de la conductividad en concentraciones altas muestran mayores dificultades para estabilizarse que en los casos de concentraciones pequeñas. Por otro lado, en concentraciones altas se puede notar una caída brusca en la conductividad a los 53 días en relación con el valor de la solución inicial, lo cual se debe a la fijación de iones cloruro que se encontraban inicialmente libres, a la muestra sólida.

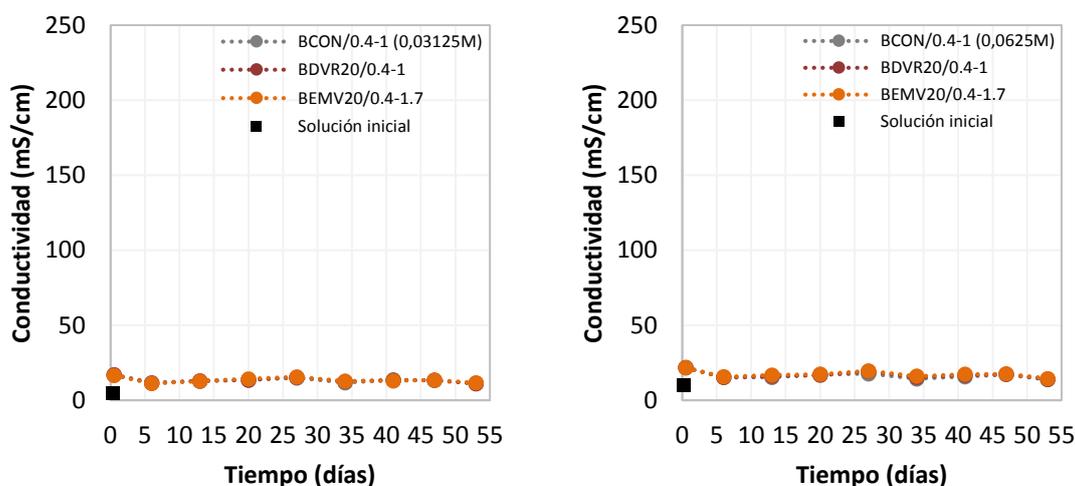


Figura 35. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 0,03125M (izquierda) y en solución de 0,0625M (derecha)

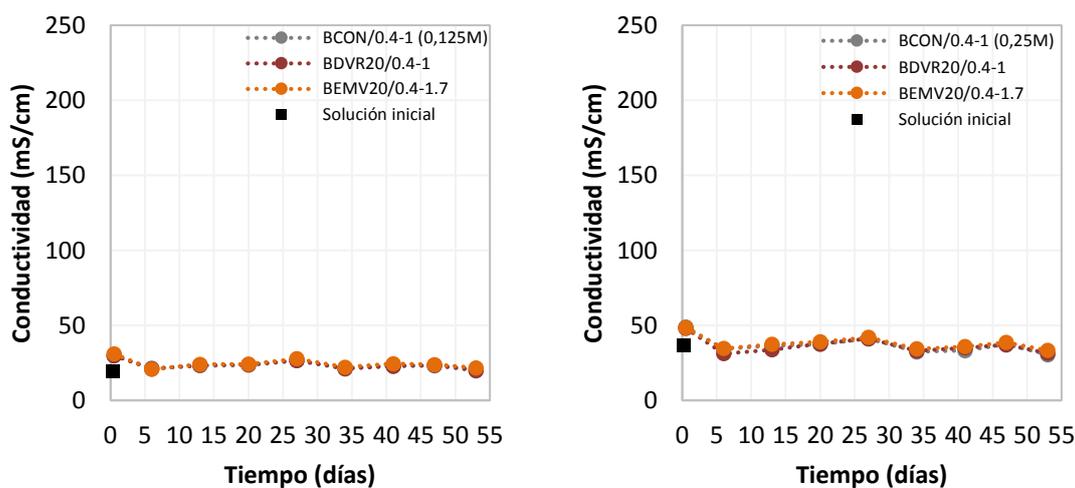


Figura 36. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 0,125M (izquierda) y en solución de 0,25M (derecha)

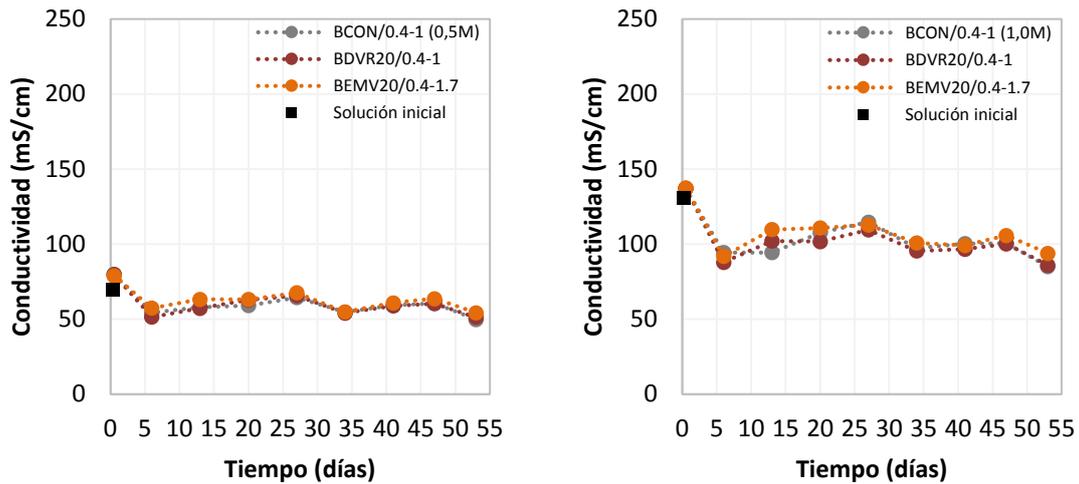


Figura 37. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 0,5M (izquierda) y en solución de 1,0M (derecha)

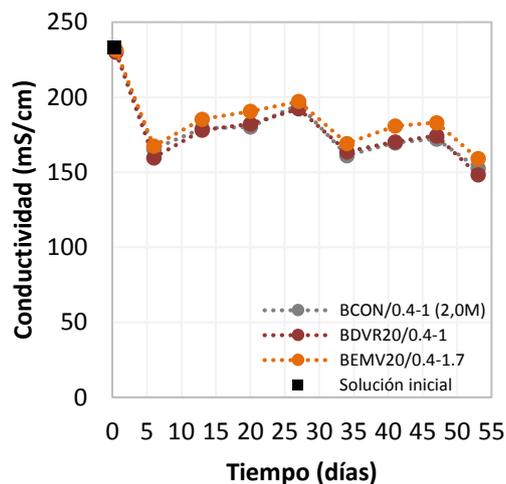


Figura 38. Valores de la conductividad en el tiempo para las muestras en solución de 2,0M

El coeficiente de variación mayor de todos los duplicados de muestras preparados, para la conductividad, fue de 1,0%.

La Figura 39 muestra los valores del pH y conductividad finales, es decir, a los 53 días, en las soluciones del hormigón convencional con áridos naturales para cada una de las concentraciones. Como se había comentado, el valor del pH disminuye en las soluciones con una concentración alta de iones cloruro, mientras que la conductividad aumenta.

Estas medidas de conductividad pueden ayudar a predecir la capacidad de fijación de cada tipo de hormigón en cada concentración. Por ejemplo, a una concentración de cloruros 0,03125M, la conductividad del hormigón convencional tiene un valor promedio de 11,33 mS/cm, mientras que el hormigón reciclado B_{DVR}20 tiene un valor de 11,11 mS/cm y el B_{EMV}20 de 11,73 mS/cm, por lo cual, a esta molaridad puede pensarse que el hormigón reciclado B_{EMV}20 es el que menos ha fijado y el B_{DVR}20 el que más.

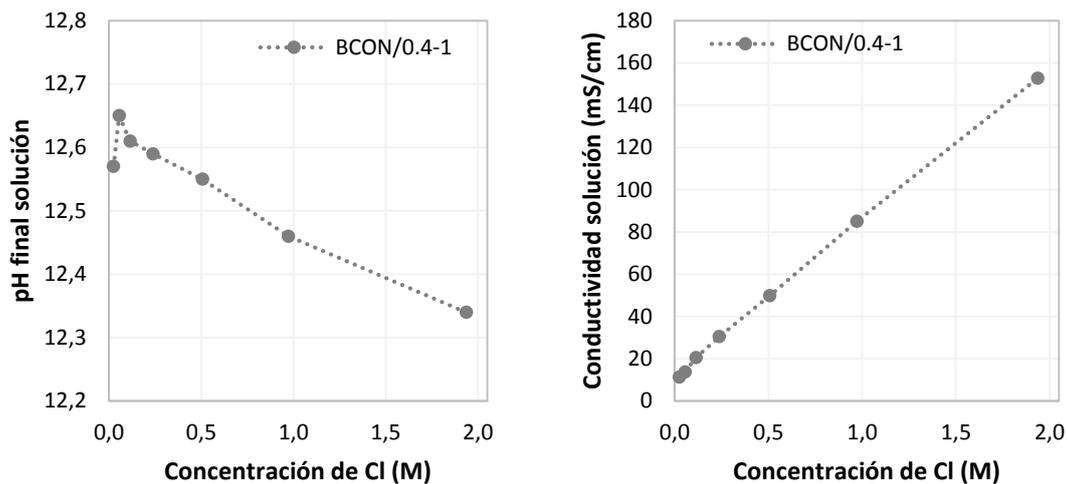


Figura 39. pH final en las soluciones a distintas molaridades que contienen al hormigón control (izquierda) y la conductividad final de cada una (derecha)

La Figura 40 muestra los valores de pH y conductividad en las soluciones de cada concentración que contienen al hormigón B_{DVR}20. El comportamiento es similar al del hormigón B_{CON}, el pH disminuye y la conductividad aumenta con la molaridad.

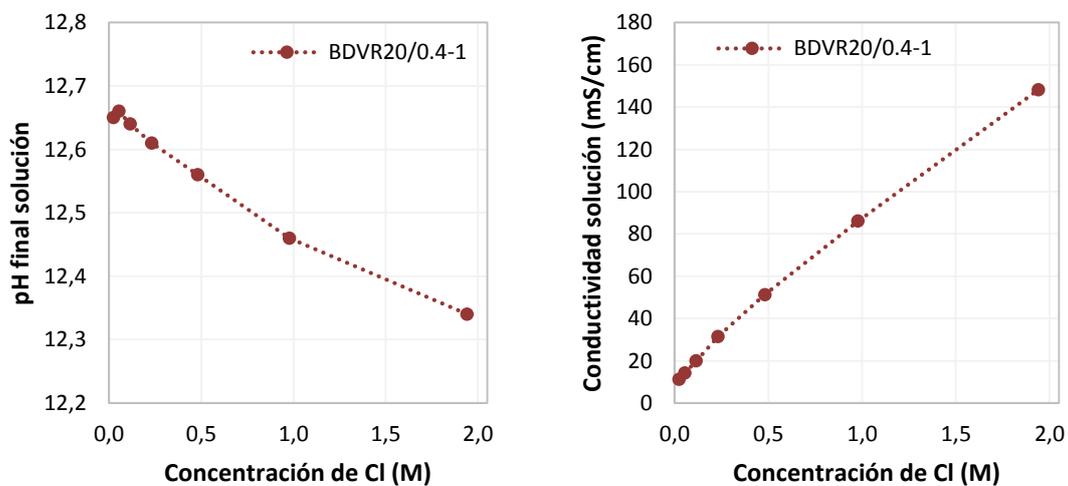


Figura 40. pH final en las soluciones a distintas molaridades que contienen al hormigón reciclado DVR (izquierda) y la conductividad final de cada una (derecha)

Los valores de pH y conductividad finales para el hormigón reciclado por el método del volumen de mortero equivalente se muestran en la Figura 41. Se puede observar que los valores de la conductividad a concentraciones altas es significativamente mayor que el de los otros dos tipos de hormigón, siendo superior un 5,6% a 0,5M, 8,31% a 1,0M y 4,06% a 2,0M, lo que podría ser un indicativo que este tipo de hormigón tiene menor capacidad de fijación a esas concentraciones.

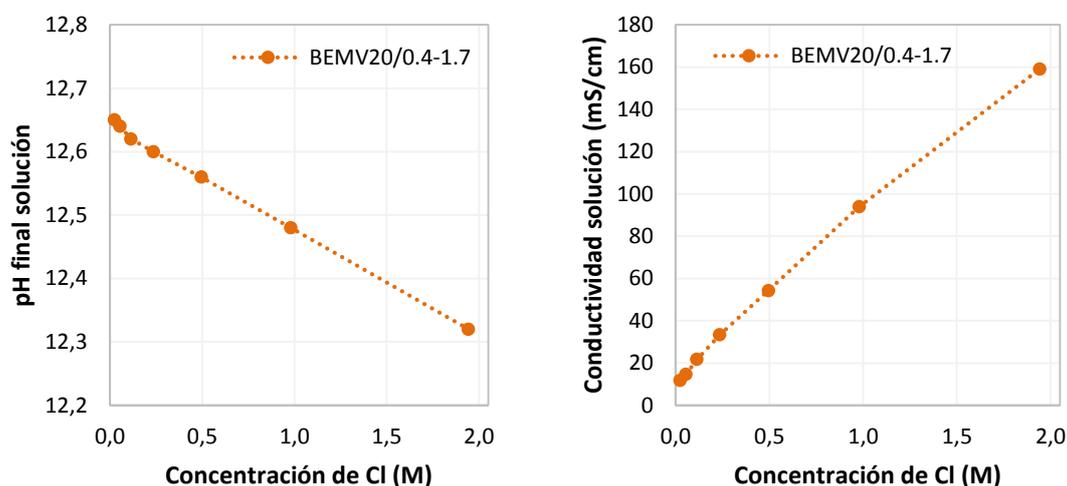


Figura 41. pH final en las soluciones a distintas molaridades que contienen al hormigón reciclado EMV (izquierda) y la conductividad final de cada una (derecha)

Las isotermas de fijación de cloruros proporcionan la cantidad de cloruros fijados como una función de la concentración de cloruros totales a temperatura constante. También se pueden presentar como la relación entre los cloruros fijos y libres. Estas isotermas son únicas en cada sistema cementicio ya que, como se mencionó en el apartado 3.5.1, la fijación está influenciada en gran medida por los componentes del sistema.

La Figura 42, Figura 43 y Figura 44 muestran las isotermas de Langmuir y Freundlich para el hormigón convencional, reciclado B_{DVR}20 y reciclado B_{EMV}20 respectivamente. Estas muestran que, en general, a bajas molaridades el hormigón B_{DVR}20 tuvo una mayor cantidad de cloruros fijados, seguido del hormigón reciclado B_{EMV}20 y el hormigón convencional el que menos, sin embargo, en las concentraciones 1M y 2M la cantidad de cloruros fijados es similar para los tres tipos de hormigón. El hecho de que el hormigón B_{DVR}20 sea el que tenga mayor cantidad de cloruros fijados responde a una causa principal relacionada con su composición. Este hormigón tiene una mayor cantidad de mortero de cemento en relación con los otros dos, debido al método de sustitución de los áridos. Un mayor contenido de conglomerante produce un incremento en la cantidad de cloruros fijados debido a la cantidad de productos de las reacciones de hidratación, como el gel CSH, que son

proporcionales a la cantidad de sitios de unión o fijación que tienen los cloruros, por lo cual, es coherente que este tipo de hormigón sea el que más cloruros haya fijado. Otro factor que podría tener relevancia es la composición de la solución de los poros, como la presencia de iones hidróxido, sin embargo, los valores de pH obtenidos en las muestras no tienen divergencias importantes entre uno y otro, por lo cual en este caso, este factor no influiría en la fijación. El hormigón B_{EMV}20, aunque tiene un contenido de cemento 7% menor, a altas concentraciones mantiene una cantidad de cloruros fijados similar a la de los otros dos tipos de hormigón y mayor en algunos casos a concentraciones bajas. Las condiciones de temperatura, tipo de cemento y relación A/C son iguales para los tres hormigones, por lo cual no se considera que tengan influencia en las diferencias de resultados obtenidos entre ellos.

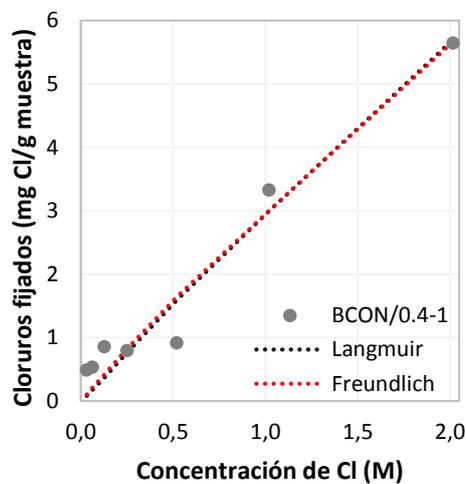


Figura 42. Isotermas de fijación de cloruros del B_{CON} en relación con la concentración inicial de cloruros totales

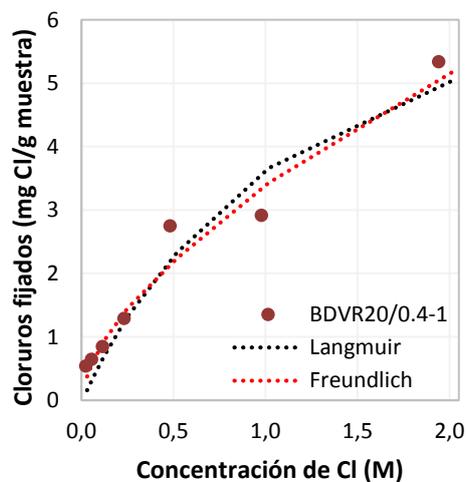


Figura 43. Isotermas de fijación de cloruros del B_{DVR}20 en relación con la concentración inicial de cloruros totales

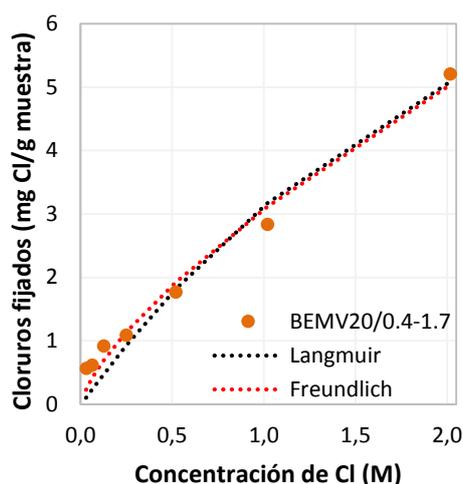


Figura 44. Isotermas de fijación de cloruros del B_{EMV}20 en relación con la concentración inicial de cloruros totales

La Tabla 4 resume los valores de cloruros fijos medidos para cada tipo de hormigón y cada molaridad.

Tabla 4. Valores medidos de cloruros fijados por tipo de hormigón y molaridad

| ID del hormigón | Cloruros fijos (mg Cl/gr muestra) | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,03125M | 0,0625M | 0,125M | 0,25M | 0,5M | 1,0M | 2,0M |
| B _{CON} /0.4-1 | 0,490 | 0,540 | 0,860 | 0,800 | 0,920 | 3,330 | 5,650 |
| B _{DVR} 20/0.4-1 | 0,540 | 0,650 | 0,850 | 1,290 | 2,750 | 2,920 | 5,340 |
| B _{EMV} 20/0.4-1.7 | 0,570 | 0,620 | 0,920 | 1,090 | 1,770 | 2,840 | 5,210 |

La capacidad del material de fijar cloruros cuando la concentración de iones cambia se denomina capacidad de fijación. Diversos estudios han señalado que la capacidad de fijación tiende a infinito cuando el contenido total de cloruros va desde cero hasta 0,5% en peso de cemento y la misma se va aproximando a cero a medida aumenta la concentración (Akita & Fujiwara, 1995).

La Figura 45 muestra la capacidad de fijación de cada uno de los hormigones a distintas concentraciones de cloruros libres iniciales. A bajas molaridades se observa que la capacidad de fijación de los hormigones fabricados con áridos reciclados es superior a la del hormigón convencional, en especial la del B_{DVR}20 que tiene la mayor fijación en las concentraciones 0.0625M, 0.25M, 0.50M, sin embargo, esta tendencia cambia a concentraciones altas en donde los valores son muy similares. Estos resultados son congruentes con los valores de las isotermas de fijación de Langmuir y Freundlich mostradas en las figuras anteriores.

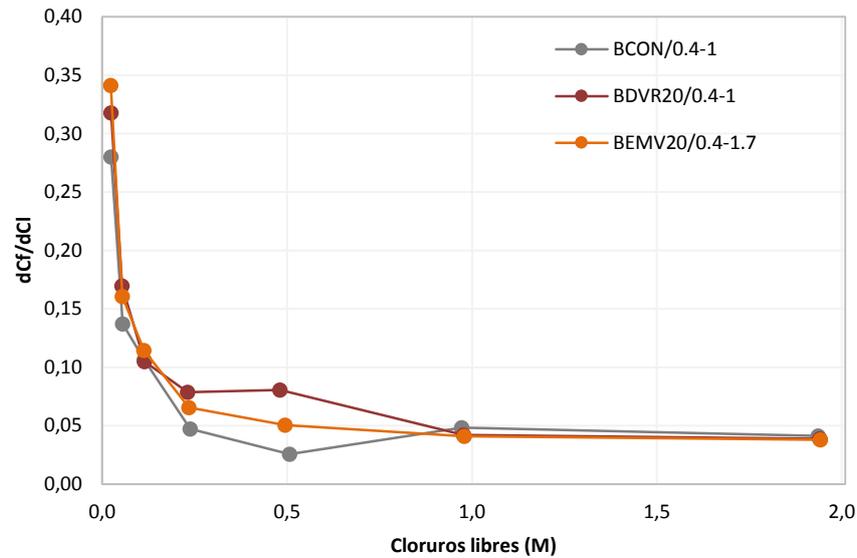


Figura 45. Capacidad de fijación de los hormigones a diferentes concentraciones de cloruros libres iniciales

5.6 Difusión de cloruros

Como se mencionó en los capítulos anteriores, en hormigones saturados y con movimiento de agua restringido, el mecanismo de transporte de cloruros es la difusión, en la cual tiene lugar un proceso de transferencia de masa debido a diferencias de concentración de iones en la solución de los poros, los cuales se desplazan de zonas de mayor a menor concentración. En los casos de difusión no estacionaria donde el flujo de masa depende del tiempo, la penetración de cloruros produce perfiles que pueden ser modelizados mediante la segunda ley de Fick, una ecuación que supone una concentración de iones en la superficie del hormigón C_s constante en el tiempo y un coeficiente de difusión de cloruros D_e que no varía en función de la profundidad desde la superficie. La Tabla 5 muestra estos parámetros de penetración en porcentajes de masa de hormigón obtenidos del ensayo de difusión de cloruros llevado a cabo para el hormigón convencional y los dos hormigones con áridos reciclados. En la misma se colocan los valores de C_s y D_e obtenidos del ajuste de la Ecuación 20 a los perfiles de penetración de cloruros tanto libres como totales obtenidos de los ensayos.

Tabla 5. Parámetros de concentración del ensayo de difusión de cloruros

| ID del hormigón | Tiempo (días) | C_s para Cl⁻ totales (%) | D_e para Cl⁻ totales (m^2/s) | C_s para Cl⁻ libres (%) | D_e para Cl⁻ libres (m^2/s) |
|-----------------------------|---------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| B _{CON} /0.4-1 | 35 | 0.676 | 1.89E-11 | 0.540 | 1.22E-11 |
| B _{DVR20} /0.4-1 | 35 | 0.915 | 1.93E-11 | 0.574 | 1.50E-11 |
| B _{EMV20} /0.4-1.7 | 35 | 0.756 | 1.43E-11 | 0.610 | 8.46E-12 |

Como se observa, el hormigón reciclado B_{EMV20} presenta coeficientes de difusión más bajos tanto para los valores obtenidos de cloruros totales como los de cloruros libres, que son los que tienen mayor relevancia en los procesos de corrosión, seguido del hormigón convencional y finalmente el B_{DVR20} que es el que tiene los coeficientes de difusión más altos. Aunque el hormigón B_{EMV20} tiene un contenido de cemento menor que los otros y, como se vio en el apartado anterior, una menor capacidad de fijación que el B_{DVR20} , presenta los menores coeficientes de difusión, ya que este parámetro no solo depende del contenido de conglomerante sino también de la estructura de poros del hormigón y de todos los factores que la determinan, ya que estos gobiernan en el nivel de restricción que tienen los cloruros de desplazarse por la solución porosa. El contenido de cemento tiene importancia en el valor de C_s que es mayor en el hormigón B_{EMV20} para los cloruros libres. En el B_{DVR20} el volumen de los poros y grado de interconexión producen que el “efecto atasco” de los cloruros sea menor, por lo cual, los coeficientes de difusión presentan valores más altos.

Desde la Figura 46 hasta la Figura 48 se muestran los perfiles de penetración de cloruros con los valores obtenidos de concentración de cloruros libres y cloruros totales en porcentaje de masa de las muestras extraídas a distintas profundidades y las curvas resultantes de los ajustes de la Ecuación 20 que determinaron los valores de C_s y D_e . Estos perfiles muestran las concentraciones de cloruros a los 35 días de exposición de los especímenes en la solución de NaCl.

Para el hormigón convencional, se puede observar que la curva obtenida por el ajuste de la ecuación de Fick que mejor se adapta a la de los valores medidos, muestra en la intersección con el eje de ordenadas el valor de la concentración de cloruros en la superficie expuesta.

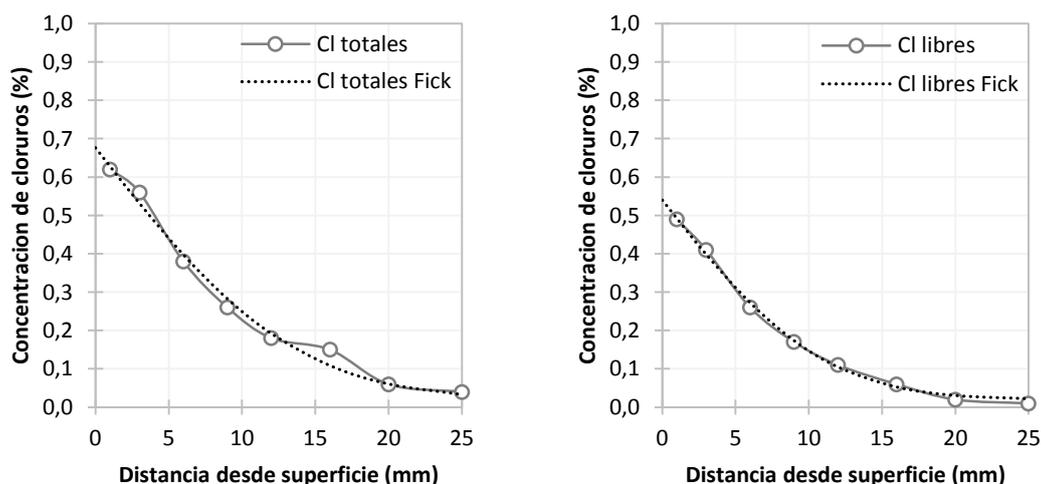


Figura 46. Perfiles de penetración de cloruros totales (izquierda) y libres (derecha) del hormigón B_{CON} y las curvas de la ecuación de Fick a los 35 días

Del mismo modo, para el hormigón reciclado B_{DVR20} se muestran las curvas de cloruros totales y libres en función a la profundidad. Se puede observar que en la curva de cloruros totales la pendiente de recta tangente en cualquier punto de la curva es mayor en este tipo de hormigón, es decir, la concentración de cloruros tiene mayores cambios en función a la profundidad desde la superficie.

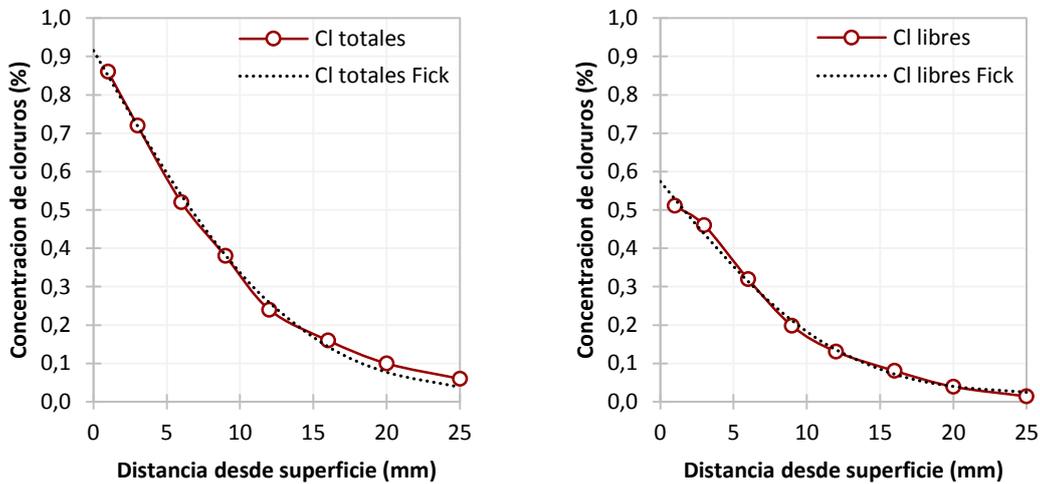


Figura 47. Perfiles de penetración de cloruros totales (izquierda) y libres (derecha) del hormigón B_{DVR20} y las curvas de la ecuación de Fick a los 35 días

El hormigón B_{EMV20} por su parte muestra concentraciones muy similares para todas las profundidades a las del hormigón convencional, sin embargo, tiene una mayor concentración de cloruros totales y libres en la superficie expuesta.

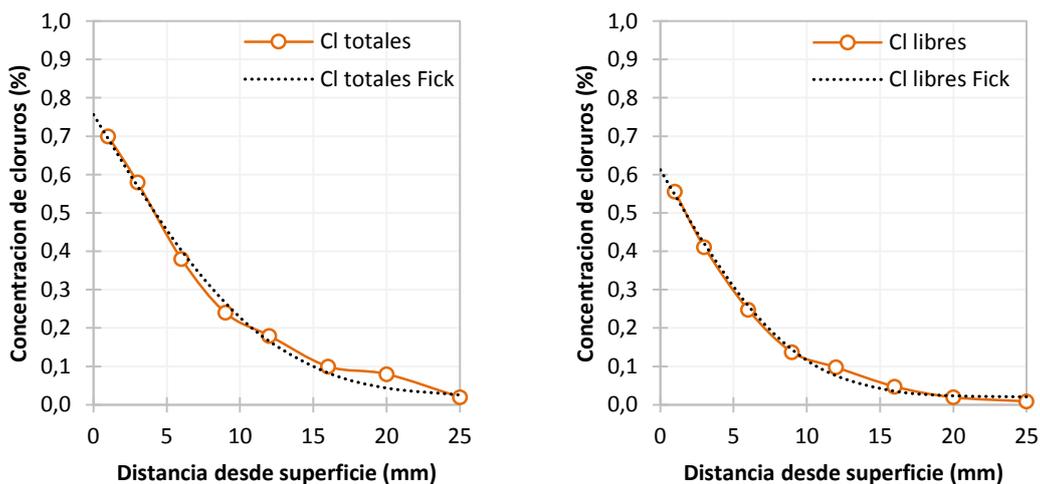


Figura 48. Perfiles de penetración de cloruros totales (izquierda) y libres (derecha) del hormigón B_{EMV20} y las curvas de la ecuación de Fick a los 35 días

La Figura 49 por otro lado, muestra los perfiles de penetración de cloruros totales para los tres tipos de hormigón. Este gráfico resulta interesante ya que se observa de forma más clara que el hormigón reciclado por métodos convencionales presenta un mayor decrecimiento en la concentración de cloruros con el aumento de la profundidad en relación con los otros dos tipos de hormigón, que vuelven a mostrar comportamientos similares. Además, como ya se ha determinado a través de los coeficientes de difusión, el hormigón B_{DVR}20 tiene una mayor concentración de cloruros en todas las profundidades.

Una de las causas probables de que el hormigón B_{DVR}20 presente un mayor decrecimiento de la concentración entre una capa y otra es la capacidad de fijación que tiene el mismo, un comportamiento comentado por Beaudoin et al. (1990) en el cual se afirma que la cantidad de cloruros fijos es directamente proporcional a la cantidad de gel CSH y teniendo en cuenta que el hormigón B_{DVR}20 tiene un mayor contenido de cemento, es de esperarse este resultado. El hormigón con una mayor capacidad de fijación tendrá un contenido más alto de cloruros totales en la superficie, sin embargo, este contenido decrece más drásticamente a medida se avanza en profundidad, en comparación con hormigones con menor capacidad de fijación, porque hay más cloruros fijados, lo que retrasa la penetración por difusión.

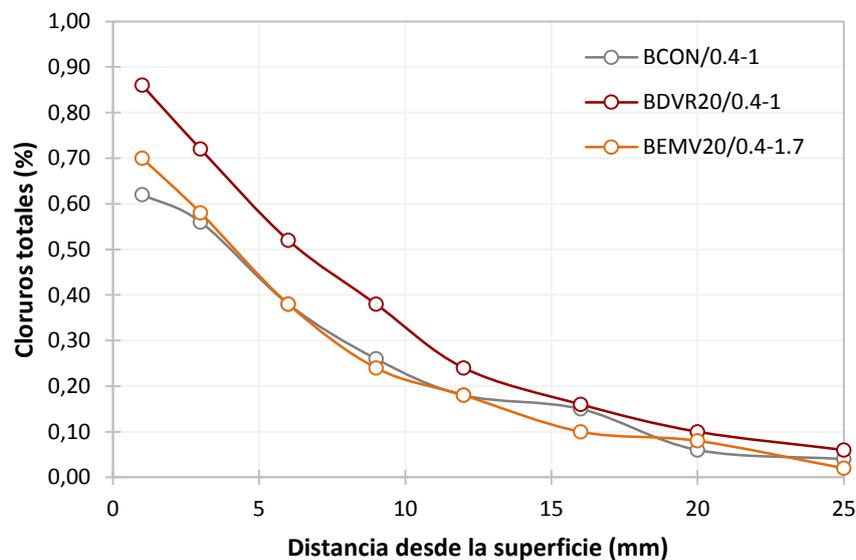


Figura 49. Perfiles de penetración de cloruros de los tres tipos de hormigón a los 35 días de exposición

La Figura 50 a la Figura 52 muestran las concentraciones de cloruros totales, libres y fijos de cada tipo de hormigón. En ellas se puede apreciar que el hormigón B_{DVR}20 fija una cantidad mayor de cloruros (aproximadamente un 40% de los totales) que la del hormigón convencional y el B_{EMV}20, en los cuales un 20% de los cloruros son fijos, pero además presenta una mayor concentración de cloruros fijos en porcentaje

de masa de muestra para todas las profundidades. Estos resultados son congruentes con los presentados en las isotermas y capacidad de fijación del apartado 5.5.

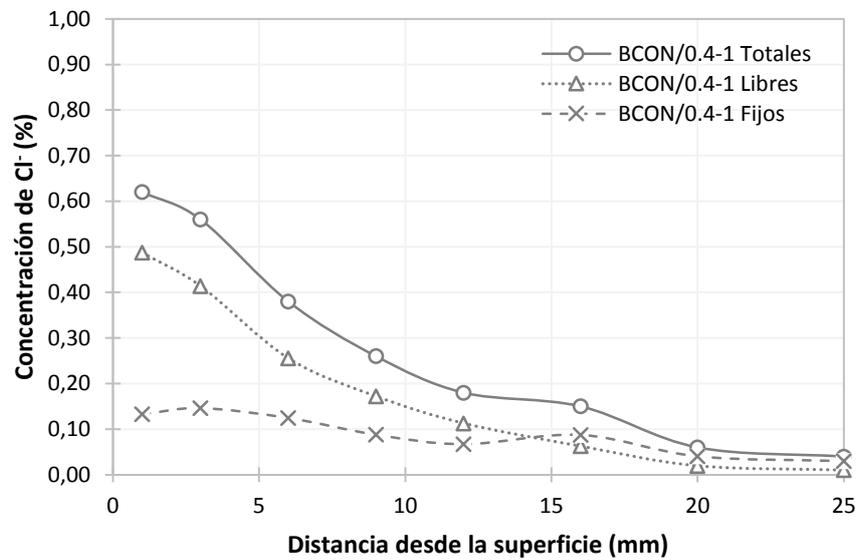


Figura 50. Concentración de cloruros libres, fijos y totales del hormigón B_{CON} en función a la profundidad

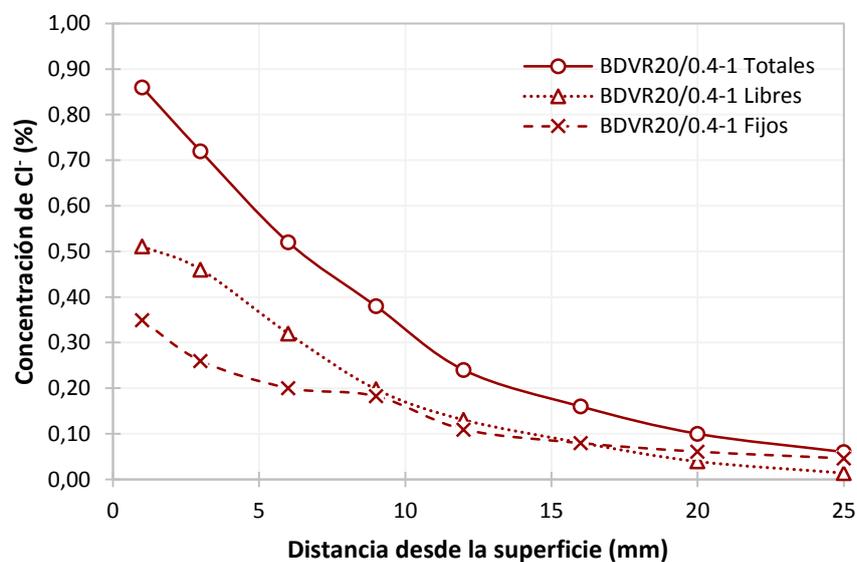


Figura 51. Concentración de cloruros libres, fijos y totales del hormigón B_{DVR20} en función a la profundidad

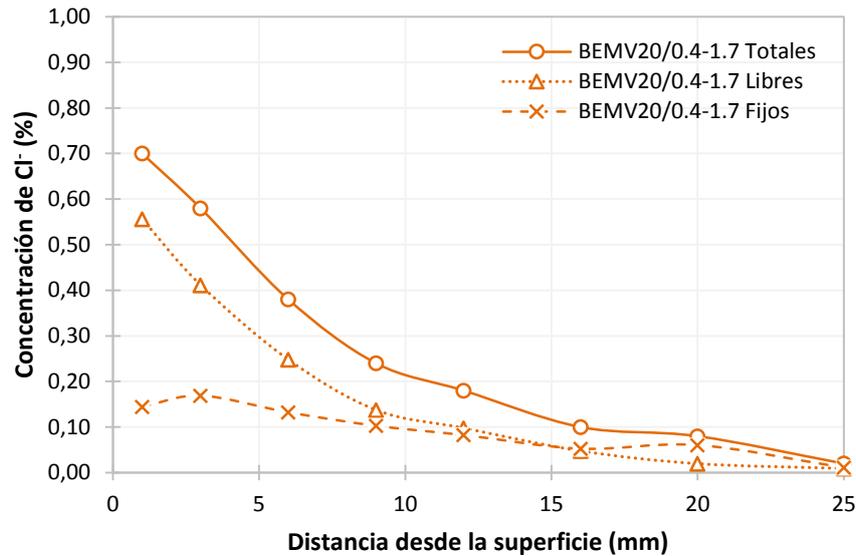


Figura 52. Concentración de cloruros libres, fijos y totales del hormigón B_{EMV-20} en función a la profundidad

Adicionalmente se realizó una evaluación de la penetración de cloruros cortando los especímenes perpendicularmente a la superficie expuesta a los 35 días y colocando una solución de nitrato de plata ($AgNO_3$) que provocará que las áreas donde hayan ingresado los cloruros se tornen de un color gris claro, mientras que las zonas no afectadas de marrón oscuro. Luego se toman 4 medidas con un calibrador, de la distancia desde la superficie, en milímetros, donde se evidencia el cambio de color. La Figura 53 a la Figura 55 muestran los especímenes del hormigón convencional y los reciclados, ya rociados con la solución de $AgNO_3$.

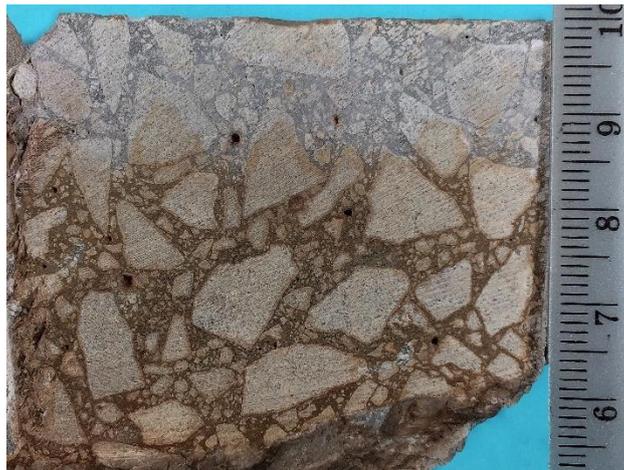


Figura 53. Especímen del hormigón B_{CON} en la evaluación de penetración de cloruros con $AgNO_3$

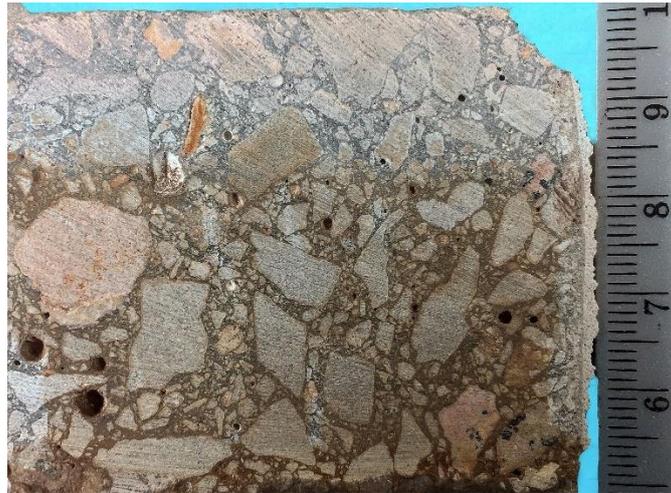


Figura 54. Espécimen del hormigón B_{DVR20} en la evaluación de penetración de cloruros con $AgNO_3$



Figura 55. Espécimen del hormigón B_{EMV20} en la evaluación de penetración de cloruros con $AgNO_3$

La Figura 56 muestra la media aritmética de los valores (en milímetros) de la penetración de cloruros a los 35 días medidos con el calibrador de cada tipo de hormigón. Cuando se comparan los hormigones con áridos reciclados se observa que el diseñado bajo el método del volumen de mortero equivalente muestra un menor ratio de ingreso de cloruros en el tiempo, lo cual está relacionado, como se ha comentado a lo largo del documento, con la estructura porosa del mismo que difiere del B_{DVR20} debido a la cantidad de mortero que contienen. El hormigón convencional por su parte es el que permitió menor ingreso de cloruros a los 35 días de exposición. Estos resultados indican que se puede mejorar notablemente el rendimiento del hormigón con áridos reciclados en lo que se refiere a la penetración de cloruros utilizando el nuevo método de dosificación.

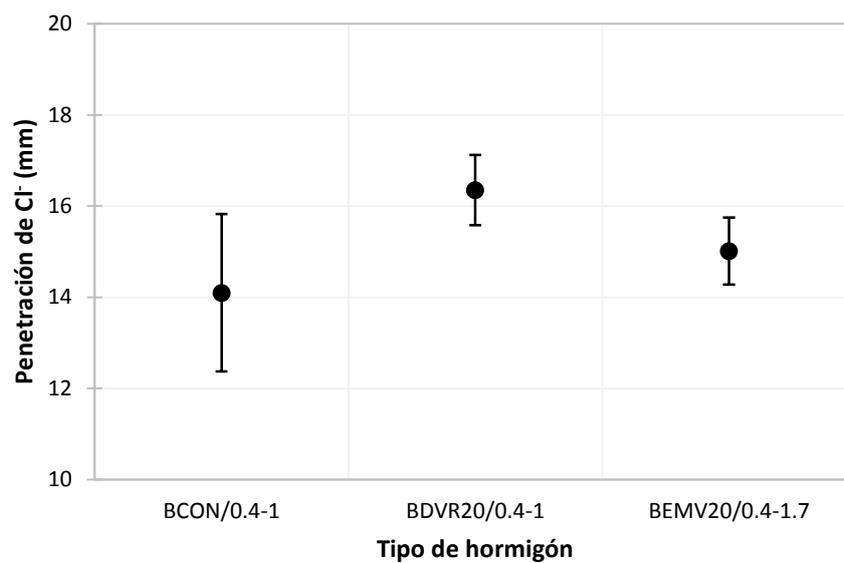


Figura 56. Penetración de cloruros, en milímetros, de los tres tipos de hormigón

6 CONCLUSIONES

Con el propósito de garantizar la sostenibilidad en las actividades de construcción con hormigón a través de la disminución del uso de recursos naturales necesarios para fabricarlo, en este trabajo de investigación se estudia la viabilidad de la utilización de áridos reciclados en el hormigón estructural. Se consideran aspectos relativos a la durabilidad como la penetración de cloruros y el transporte de agua en el interior del hormigón que puedan facilitar la movilización de agentes agresivos hacia las armaduras embebidas. Se han evaluado, respecto al diseño y propiedades de durabilidad mencionadas, dos hormigones fabricados con áridos reciclados y uno con áridos naturales. La diferencia entre los hormigones reciclados es básicamente el método de diseño de mezcla, que resulta en la utilización de menos cemento en el diseñado bajo el método de volumen de mortero equivalente. Los resultados indican que el hormigón con áridos reciclados diseñado bajo la nueva metodología del volumen de mortero equivalente alcanza propiedades de durabilidad similares a las del hormigón fabricado con áridos naturales en todos los ensayos realizados, por lo cual es posible utilizarlo sin que se vea afectado de forma significativa el desempeño de la estructura durante su vida útil.

Por otro lado, el hormigón fabricado con áridos reciclados y diseñado por métodos clásicos muestra un comportamiento más desfavorable en la mayoría de los ensayos realizados debido a las características de su estructura porosa que son atribuidas al exceso de mortero adherido a los áridos.

De cada uno de los ensayos llevados a cabo se han podido reunir conclusiones específicas que se detallan a continuación:

- El diseño de hormigones con áridos reciclados utilizando la metodología del volumen de mortero equivalente disminuye significativamente la porosidad en comparación con hormigones reciclados diseñados a través de metodologías clásicas. Los resultados obtenidos muestran que el hormigón reciclado por el nuevo método tiene diferencias mínimas con el hormigón convencional en el porcentaje de volumen de poros, y logra reducirse un 8,6% en relación al hormigón reciclado B_{DVR20} .
- En hormigones con áridos reciclados diseñados por el nuevo método también se logra reducir el porcentaje de absorción con respecto al hormigón reciclado diseñado con otras metodologías. Tanto el ensayo de succión capilar como el de adsorción/desorción arrojaron resultados concluyentes, en el que se aprecia que el hormigón B_{EMV20} tiene una absorción un 10% menor a la del B_{DVR20} y apenas un 1,76% superior a la del convencional.

- Como una consecuencia directa de la porosidad, el hormigón reciclado diseñado por métodos clásicos muestra una densidad seca 1,5% menor que la del hormigón convencional y hormigón reciclado B_{EMV}20. Con la nueva metodología de diseño se puede lograr que el hormigón reciclado tenga una porosidad igual a la de un hormigón diseñado con áridos naturales. En los ensayos tuvieron una diferencia de apenas 0,01%.
- Al igual que la densidad seca, la densidad aparente es ligeramente menor en el hormigón reciclado B_{DVR}20 ya que tiene un mayor volumen de vacíos en la matriz debido al mortero adherido a los áridos. El hormigón reciclado diseñado por la nueva metodología tiene una densidad aparente igual a la del hormigón con áridos naturales.
- El hormigón B_{DVR}20 gana y pierde mayor cantidad de agua durante los procesos de succión capilar y secado respectivamente con respecto a los otros hormigones, lo que permite deducir que su estructura porosa transporta agua con mayor facilidad. Cambiando la metodología de diseño del hormigón reciclado a la del volumen de mortero equivalente se puede obtener un comportamiento muy similar al de los hormigones convencionales, lo que implica que también lo será su desempeño frente al transporte de agentes agresivos en la solución de los poros a lo largo del tiempo. Los valores de la absorptividad inicial y absorptividad secundaria son mayores en todos los casos en el hormigón reciclado diseñado por métodos clásicos, mientras que los del convencional y el B_{EMV}20 son similares. Lo mismo ocurre en las curvas de pérdida de masa en relación al tiempo, en las cuales el hormigón reciclado B_{EMV}20 tuvo incluso un mejor comportamiento que el convencional, lo que producirá que en ciclos de humidificación y secado, haya menos movimiento de agua en su interior que desplace cloruros y otros agentes agresivos hacia las armaduras.
- A través del ensayo de adsorción-desorción se determinó que el hormigón reciclado diseñado por la nueva metodología alcanza el equilibrio con la humedad relativa del ambiente sufriendo menores porcentajes de cambio de masa en relación con el hormigón reciclado diseñado por métodos clásicos. Por otro lado, las isotermas de sorción muestran que en el hormigón reciclado B_{EMV}20 la diferencia en la cantidad de agua en los poros entre las humedades relativas altas y bajas es menor que la del hormigón reciclado B_{DVR}20, lo que sugiere que este último tiene una predisposición a ganar o a perder más agua en el intercambio de humedad con el ambiente. Ajustando por tanto la metodología de mezcla se logra que el hormigón con áridos reciclados tenga un comportamiento similar al del hormigón convencional debido a que se obtiene una estructura porosa menos interconectada (menos permeable) y con una geometría en los poros que evita ciclos de histéresis más anchos.

- Debido a que un mayor contenido de conglomerante incrementa la cantidad de cloruros fijados ya que aumentan los sitios de unión de cloruros, la disminución del contenido de cemento en el hormigón reciclado B_{EMV20} (debido a la consideración del mortero adherido a los áridos) produce que tenga una menor capacidad de fijación que el hormigón reciclado B_{DVR20}. Aunque el hormigón reciclado diseñado por métodos clásicos fija más iones cloruro y por lo tanto, podría reducir el gradiente de concentración que estimula la difusión, su estructura porosa provoca elevadas concentraciones en la superficie como se vio en el ensayo de difusión de cloruros, por lo cual la cantidad de cloruros fijados, por sí solo, no le ayuda a contrarrestar su baja resistencia a ser penetrado por los cloruros.
- A través del ensayo NT Build 443 (1995) se determinó que si se fabrican hormigones con áridos reciclados utilizando la metodología de diseño del volumen de mortero equivalente se pueden reducir significativamente los coeficientes de difusión respecto a hormigones reciclados diseñados por metodologías clásicas. Estos coeficientes se redujeron un 25,91% para los cloruros totales y de 43,60% para los cloruros libres. Este hecho se atribuye a que el volumen de poros y su grado de interconexión es mayor debido al exceso de mortero adherido en los áridos, que provoca que exista un menor efecto de bloqueo en la difusión de cloruros a través de la película de agua en los poros hacia el interior. Asimismo, el hormigón reciclado B_{EMV20} presenta un coeficiente de difusión para cloruros totales 24,34% menor que el del hormigón convencional y 30,66% para cloruros libres, lo cual quiere decir que reduciendo el contenido de cemento se pueden mejorar significativamente las propiedades de durabilidad del hormigón reciclado. Por otro lado, utilizando el nuevo método para la fabricación de hormigones con áridos reciclados se puede lograr una disminución importante de la concentración de cloruros totales en la superficie y un comportamiento similar al de los hormigones convencionales.

7 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para futuras investigaciones se propone evaluar la difusión y fijación de cloruros de hormigones con áridos reciclados en edades superiores a los 35 días. Esto debido a que la capacidad de fijación del hormigón B_{DVR}20 puede disminuir con la edad porque a tempranas edades hay mayor cantidad de CSH disponible lo que permite fijar más cloruros, sin embargo a edades avanzadas esto no es así, lo que provoca que los procesos de difusión ya no estén gobernados por este parámetro.

Se propone realizar un estudio similar en hormigones dosificados por métodos convencionales y el método de volumen de mortero equivalente, utilizando otras relaciones A/C que puedan afectar la estructura porosa y la cantidad de productos de la hidratación donde se fijan los cloruros.

Se debe determinar el comportamiento de estos hormigones frente a otros mecanismos de deterioro como la carbonatación, cuya velocidad de avance también puede ser modelada por la segunda Ley de Fick y está influenciada por la estructura porosa de dichos hormigones, el tipo de conglomerante y el grado de saturación de los poros, entre otras cosas.

De igual forma, el transporte de compuestos químicos como los sulfatos en el agua de los poros puede generar que estos reaccionen con compuestos hidratados del cemento, provocando reacciones expansivas en la pasta. Por lo cual, conviene estudiar la influencia de la composición de los hormigones con áridos reciclados presentados en este documento en su resistencia al ataque sulfático.

Puesto que el tipo de conglomerante, como se ha visto, juega un papel fundamental en muchos aspectos relativos a la durabilidad del hormigón, conviene realizar estudios similares utilizando otros tipos de cemento.

8 REFERENCIAS

- ACI Committee 555. (2001). *Removal and Reuse of Hardened Concrete*. Detroit: American Concrete Institute.
- Ahmed, S. (2003). *Reinforcement corrosion in concrete structure, its monitoring and service life prediction-a-review*. Cement and Concrete Composite 30.
- Akita, H., & Fujiwara, T. (1995). *Water and salt movement within mortar partially submerged in salty water*. Sapporo: E&FN Spon.
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., & Gutierrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behaviour at different w/c ratios. *Waste Manage* 2707–16, 10.
- Andal, J., Shehata, M., & Zacarias, P. (2016). Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. *Construction and Building Materials* 125, 842–855.
- Angulo, S., & Mueller, A. (2009). Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. *Materials and Structure, Vol. 42, No. 6*, 739-748.
- Anink, D., Boonstra, C., & Mak, J. (1996). *Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment*. Londres.
- ASTM C1585-04. (2004). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C1792-14. (2014). *Standard Test Method for Measurement of Mass Loss versus Time for One-Dimensional Drying of Saturated Concretes*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C642-97. (1997). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM E104-02. (2012). *Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Barra, M. (1996). *Estudio de la durabilidad del hormigón reciclado en su aplicación como hormigón armado (Tesis Doctoral)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

- Beaudoin, J. J., Ramachandran, V. S., & Feldman, R. F. (1990). Cement and Concrete Research, V. 20, No. 6. *Interaction of Chloride and C-S-H*, 875-883.
- Biczók, L. (1967). *Concrete corrosion and concrete protection*. New York: Chemical Publishing Co. Inc.
- Blunk, G., Gunkel, P., & Smolczyk, H. G. (1986). On the Distribution of Chloride Between the Hardening Cement paste and Its Pore Solution. *8th International Congress on the Chemise of Cement*, 85-90.
- Brunauer, S., Emmet, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layer. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 60, No. 2, 309-319.
- Byfors, K. (1990). Chloride-Initiated Reinforcement Corrosion. Chloride Binding. *CBI Report 1:90*, 1-121.
- Claisse, P. A. (2016). *Civil Engineering Materials*. Waltham, MA: Elsevier Ltd.
- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9):1616–1620, ISSN 09500618.
- de Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D., & Guerreiro, M. (2016). Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 7-9.
- de Castro, S. (2012). Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 10-13.
- de Sitter, W. R. (1984). *Cost for service life optimization - the "law of fives"*. Copenhagen: Durability of Concrete Structures, Workshop report of the CEB-RILEM.
- Diamond, S. (1986). Chloride Concentrations in Concrete Pore Solutions Resulting from Calcium and Sodium Chloride Admixtures. *Cement, Concrete and Aggregates*, V. 8, No. 2, 97-102.
- Dobrowolski, J. (1998). *Concrete Construction Handbook*. New York: Mc-Graw-Hill Inc.
- EHE. (2008). *Instrucción Española de Hormigón Estructural*. Madrid.
- Eurostat. (2014). *European Commission: Generation of waste by economic activity*. Obtenido de <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00106&language=en>

- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B., & Foo, S. (2009). New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 21, No. 10, 601-611.
- Fidjestøl, P., & Tuutti, K. (1995). *The importance of chloride diffusion*. Saint-Rémy: Proceed-ings of the RILEM Workshop on "Chloride Penetration into Concrete".
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion engineering*. London: Mc-Graw Hill Book Company, 3rd edition .
- Garcés, P., Climent, M. A., & Zornoza, E. (2008). *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado*. San Vicente, Alicante: Editorial Club Universitario.
- Gjørsv, O. E., & Vennesland, ø. (1987). Evaluation and control of steel corrosion in offshore concrete structures. *Conf. on Concrete Durability* (págs. 1575-1602). Atlanta: ACI SP-100.
- Gonçalves, A., Esteves, A., & Vieira, M. (2004). Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 554-562.
- González, E., Barra, M., & Valls, S. (2012). *Nueva técnica de dosificación de hormigones reciclados: Método del volumen de mortero equivalente (Tesis de Máster)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Hansson, C. (1984). *Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete*. Cement and Concrete Research 14.
- Hansson, C. (2007). *Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete*. Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 3013.
- Helene, P. (1997). *Vida útil das estruturas de concreto*. Porto Alegre: Anales IV CONPAT, Tomo 1.
- Hussain, S. E., & Rasheeduzzafar. (1993). Effect of Temperature on Pore Solution Composition in Plain Cements. *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 6, 1357-1368.
- Ipavec, A., Vuk, T., Gabrovšek, R., & Kaučič, V. (2013). Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity. *Cement and Concrete Research*, Vol. 48, 74–85.
- Jimenez, C. (2015). *Sustainability concepts applied to the design of recycled aggregates concrete*. Barcelona.

- Karlsson, M., & Poulsen, E. (1995). *Design of rebar covers in marine concrete structures - Probabilistic approach*. Saint-Rémy les Chevreuse: RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete.
- Kielsgaard, K. (1986). *Sorption Isotherms. A catalogue*. Kongens Lyngby: Building Materials Laboratory. The Technical University of Denmark.
- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., & Lai, W. L. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Manage* 621–8, 29.
- 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(1), ISSN 0950-0618, 565–573.
- Larsen, C. K. (1998). *Chloride binding in concrete-Effect of surrounding environment and concrete composition*. Trondheim, Norway: Ph.D. Thesis, The Norwegian University of Science and Technology.
- Levy, S., & Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 34(11), ISSN 0008-8846, 1975–1980.
- Maage, M., Poulsen, E., Vennesland, Ø., & Carlsen, J. (1995). *Service life model for concrete structures exposed to marine environment - initiation period*. Trondheim: LIGHTCON Report No. 2.4, STF70 A94082 SINTEF.
- Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 25(2):742–748. ISSN 09500618.
- Martys, N. S., & Ferraris, C. F. (1997). Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 5, 747-760.
- Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., & Pedro, D. (2014). Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers. *J. Mater. Civil Eng.* 26.
- Mehta, P. K. (1977). Effect of Cement Composition on Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete. *Chloride Corrosion of Steel in Concrete*, 12-19.

- Mehta, P., & Monteiro, P. (2013). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. New York: McGraw-Hill Education; 4 edition.
- Midgley, H. G., & Illston, J. M. (1984). The penetration of Chlorides into hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *V. 14, No. 4*, 546-558.
- Montoya, P. J. (2000). *Hormigón Armado*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Naumov, S. (2009). *Hysteresis Phenomena in Mesoporous Materials (Doctoral Thesis)*. Leipzig: Universitat Leipzig.
- Neville, A. (1995). Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structures*, *V. 28*, 63-70.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Harlow: Pearson, fifth edition.
- NT Build 443. (1995). *Concrete, Hardened: Accelerated chloride penetration, ISSN 0283-7153*. Espoo, Finland: NORDTEST.
- Olorunsogo, F., & Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, *32(2)*, ISSN 0008-8846, 179–185.
- Omary, S., Ghorbel, E., & Wardeh, G. (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*, 171-173.
- Omary, S., Ghorbel, E., & Wardeh, G. (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*, *Vol. 108*, 163–174.
- Otsuki, N., Miyazato, S., & Yodsudjai, W. (2003). *Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete*. American Society of Civil Engineers.
- PCA. (2002). *Types and Causes of Concrete Deterioration*. Skokie: PCA R&D Serial No. 2617.
- Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, I. (2007). Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures*, *Vol. 40, No. 9*, 981–988.
- Pourbaix, M. (1974). *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Paris: National Association of Corrosion Engineers.
- Poursae, A. (2016). *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. Duxford: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering No. 61.

- Rasheeduzzafar, E. (1992). Influence of Cement Composition on Concrete Durability. *ACI Materials Journal*, *V. 89*, No. 6, 574-585.
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Roberts, M. H. (1962). Effect of calcium chloride on the durability of pre-tensioned wire in prestressed concrete. *Magazine of Concrete Research*, *V. 14*, No. 42, 143-154.
- Sánchez, M., & Alaejos, M. P. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural (Tesis doctoral)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez, M., & Alaejos, M. P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, *Vol. 23*, No. 2, 872-877.
- Smolczyk, H. (1976). *Physical and chemical phenomena of carbonation in carbonation of concrete*. Prague: RILEM International Symposium. Cement and Concrete Association.
- Somerville, G. (1986). The design life of concrete structures. *The Structural Engineer* *Vol 64A*, 60.
- Suryavanshi, A. K., Scantlebury, J. D., & Lyon, S. B. (1995). The Binding of Chloride Ions by Sulphate Resistant Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, *V. 25*, No. 3, 581-592.
- Suryavanshi, A. K., Scantlebury, J. D., & Lyon, S. B. (1996). Mechanisms of Friedel's Salt Formation in Cements Rich in Tricalcium Aluminate. *Cement and Concrete Research*, *V. 26*, No. 5, 717-727.
- Tang, L., & Nilsson, L. (1993). Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Pastes and Mortars. *Cement and Concrete Research*, *V. 23*, No. 2, 247-253.
- Tang, L., & Nilsson, L. (1995). "Chloride binding isotherms - An approach by applying the modified BET equation". *Chloride Penetration into Concrete* (págs. 36-42). Proceedings of the International RILEM Workshop.
- Taylor, P., Tennis, P., Obla, K., Ram, P., Van Dam, T., & Dylla, H. (2013). *Transportation Research Circular E-C171, Durability of concrete, second edition*. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- Thuresson, T. (1996). *Electrochemical Monitoring of the Influence of Concrete Quality on the Reinforcing Steel Corrosion in Industrial Effluent*. Kingston: Queen's University.

- Tritthart, J. (1989). Chloride binding in cement II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding. *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, No. 5, 683-691.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Vázquez, E., Barra, M., Aponte, D., Jiménez, C., & Valls, S. (2013). Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials*, ISSN 09500618, 61-67.
- Villagrán, Z. Y., & Matiasich, C. (2004). Capacidad de fijación y adsorción de cloruros en morteros elaborados con distintos cementos. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, N° 11, 59-72.

