



Facultad de Ingeniería

Escuela de Construcción Civil

Evaluación de la durabilidad del hormigón con áridos reciclados expuestos a ciclos hielo-deshielo.

Por

José Miguel Molina Huerta

Trabajo de Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias
de la Construcción y al Título de Ingeniero Constructor.

Prof. Guía Andrés Jamet Aguilar

Diciembre, 2015

Dedicatoria

“La victoria es para el más perseverante” Napoleón Bonaparte (1769-1821)

Dedico éste trabajo a mis padres María y Jorge, los cuales me han acompañado desde que partí en esta aventura. Siempre estando ahí para apoyarme y alentarme siendo un pilar fundamental en mi desarrollo personal y profesional.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que me ayudaron y estuvieron ahí para apoyarme en los momentos más oscuros y difíciles por los cuales pasé en esta larga memoria.

Agradecimientos a mi profesor guía por responder a todas mis dudas. A Aldo y a don Víctor por ayudarme en el laboratorio y realizar los ciclos hielo-deshielo.

También no puedo olvidar a mi hermano Jorge que fue mi mano derecha en la producción de árido reciclado, fabricación de los tantos hormigones y luego en los ensayos que realicé, nombrando también a nuestros amigos Daniel Soto, Fabián Jiménez, Claudia Valdebenito, Pablo Villalobos, Víctor Gutiérrez, Juan Pablo Mella, Diego Olivares. A todos ellos y a la gente que no nombro por lo frágil de mi memoria, les doy las gracias por ayudarme y hacer que mi trabajo pudiera realizarse con éxito.

Por último pero no menos importante, a mi novia Ingrid por la paciencia inagotable que ha tenido conmigo en todo el tiempo que duró mi memoria.

A todos ustedes, muchas gracias.

José Molina Huerta.

Resumen

El siguiente estudio evaluó la durabilidad de los hormigones expuestos a ciclos hielo-deshielo, con distintos contenidos de árido reciclado, planteando que a mayor contenido de árido reciclado, aumenta la durabilidad del hormigón.

El árido reciclado (A.R) fue elaborado a partir de probetas desechadas de laboratorio y se produjo en tres etapas, molido manual, selección y tamizado en laboratorio, separando 2 tamaños máximos de áridos, 20 mm. y 40mm. Elaborando hormigones con una razón a/c de 0,40 y contenidos de árido reciclado (A.R.) en reemplazo del árido natural por peso, de manera ascendente en intervalos de 25%.

Para evaluar el comportamiento de los hormigones con los distintos tratamientos, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y permeabilidad al agua, antes y después de aplicar ciclos hielo-deshielo.

Los resultados obtenidos luego de someter a los hormigones a ciclos hielo-deshielo, muestran un aumento de la resistencia a la compresión en un 32% para el hormigón patrón con árido tamaño máximo de 20 mm y un promedio de 21% para los hormigones con A.R. tamaño máximo 20mm, un 8% para el hormigón patrón con árido tamaño máximo de 40 mm. y un promedio de 49% para los hormigones con A.R. tamaño máximo 40mm.

En el caso de la permeabilidad ocurrió que para el hormigón con árido tamaño máximo 20 mm. con un contenido de A.R. de 50%, aumentó de manera significativa, un 54% sin una pérdida de resistencia a la compresión luego de someterse a los ciclos hielo-deshielo. En cambio para los hormigones con A.R. tamaño máximo 40 mm. la permeabilidad tiende a subir un 14,3% para los hormigones con contenido de A.R. luego de someterse a ciclos hielo-deshielo.

Los resultados obtenidos en éste estudio, indican que la resistencia a la compresión para hormigones con distintos contenidos de A.R con tamaños de árido máximo de 20mm. y 40mm. puede aumentar antes de 50 ciclos hielo-deshielo y también la permeabilidad aumenta sin disminuir la resistencia a la compresión.

Palabras clave: Árido reciclado, Permeabilidad, Resistencia a la Compresión, Ciclos hielo-deshielo.

Abstract

The next experimental study aims to evaluate the durability of concrete on freeze and thaw conditions with recycled aggregate in different content levels. And proposing that more recycled aggregate content the durability would be higher.

The recycled aggregate (R.A.) was produced in three stages by manual grinding, selection and sieve process from discarded specimens made by the laboratory. For the experimental tests are two different maximum sizes of aggregates, 20mm. and 40mm. Making concretes with w/c ratio of 0,40 and recycled aggregate contents replaced by weight of natural aggregate increasing the replacement by 25%.

To evaluate the behavior of concrete with different contents of recycled aggregate. Compression strength and permeability of water under pressure tests were made before and after freeze and thaw cycles to evaluate and compare the properties of the concretes in study.

The tests results of control concrete with 20mm. maximum size aggregate after freeze and thaw cycles show a rising on the compressive strength by 32% and 21% average for recycled aggregate concretes with 20mm. maximum size aggregate. And 8% increase of compressive strength for the control concrete with 40mm. maximum size aggregate, and 49% average increase on compressive strength for the concretes made with recycled aggregate.

The permeability increased significantly by 54% without compressive strength loss for the concrete made with 50% of recycled aggregate 20mm. maximum size after freeze and thaw cycles. By the other hand the concretes made with recycled aggregate 40mm. maximum size the permeability tend to rise an 14,3% average after freeze and thaw cycles.

The results drawn in this experimental study indicates that the compressive strength for concretes with different levels of recycled aggregate and maximum size aggregate 20mm. and 40mm. could increase before 50 freeze and thaw cycles also the permeability increase without compressive strength loss.

Key words: Recycled aggregate, Permeability, Compressive strength, Freeze and thaw cycles.

Índice

Resumen	4
Abstract	5
Glosario	8
Lista de abreviaturas	11
Lista de figuras	12
Lista de tablas	14
 1. Antecedentes Generales	 16
 2. Objetivos	 18
2.1 Objetivo General	18
2.2 Objetivos Específicos	18
 3. Alcances	 19
 4. Hipótesis	 20
 5. Marco Teórico	 21
5.1 Durabilidad	21
5.2 Ciclo Hielo-Deshielo	22
5.3 Árido Reciclado	23
5.4 Estudio del árido reciclado en el hormigón	23
5.5 Exposición a ciclos hielo-deshielo y durabilidad	25
5.6 Aditivo Incorporador de aire	26
 6. Metodología de Trabajo	 28
6.1 Introducción	28
6.2 Diseño de la Experiencia.....	28
6.3 Materiales y Métodos	30
6.3.1 Áridos	30
6.3.2 Cemento.....	35
6.3.3 Aditivo incorporador de aire	35
6.4 Dosificación Hormigones.....	36
6.5 Fabricación del Hormigón	41
6.6 Ensayos.....	43
6.6.1 Ensayo de docilidad	43
6.6.2 Porcentaje de aire en estado fresco.	43
6.6.3 Penetración de agua bajo presión.	44
6.6.4 Ciclos hielo-deshielo.	44
6.6.5 Compresión	44

7. Resultados Obtenidos	45
7.1 Análisis Descriptivo	45
7.2 Análisis de Estadística Descriptiva	46
7.2.1 Propiedades del hormigón en estado fresco.....	46
7.2.2 Resistencia a la Compresión	51
7.2.3 Permeabilidad al agua bajo presión.....	54
7.3 Análisis estadístico de los resultados	57
7.3.1 Resistencia a la Compresión	58
7.3.2 Permeabilidad al agua.....	61
 8. Discusión Bibliográfica de Resultados.....	 65
 9. Conclusiones	 68
 10. Propuesta de Futuras Investigaciones	 70
 Referencias	 71
 11. Anexos.....	 75
Anexo A : Tablas de datos recopilados	76
Anexo B : Seguimiento a ciclos hielo-deshielo	88

Glosario

Aditivo: Material activo agregado al hormigón en pequeñas cantidades para modificar alguna de sus propiedades por acción física, química o físico-química.

Agregado tipo A: Es una mezcla de sustancias compuestas de un material calcáreo-arcilloso que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900 °C y otros materiales a base de óxidos de silicio, aluminio y hierro. El contenido de calcio del agregado, expresado como CaO total, fluctuará entre 5% mínimo y 30% máximo

Amasada: Fracción más pequeña del hormigón fabricado de una vez.

Árido: Material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.

Árido combinado: Árido resultante de la combinación de árido fino y árido grueso en proporciones definidas por el estudio de dosificación y que se ha de emplear en la confección de un hormigón

Árido fino: Árido que pasa por el tamiz de abertura de 4,75mm y es retenido en el tamiz de 0,075mm.

Árido grueso: Árido retenido en el tamiz de abertura de 4,75mm.

Árido natural: Árido procedente de yacimientos pétreos y que no ha sido sometido a proceso de trituración.

Árido reciclado: Áridos resultante del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción

Cemento: Material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.

Cemento con agregado tipo A: Producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, agregado tipo A y yeso y que pueda aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado.

Cemento Portland: Producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso y que pueda aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado.

Ciclo hielo-deshielo: Periodo de tiempo en donde la temperatura baja produciendo la solidificación del agua y posterior aumento de temperatura en el cual el agua vuelve a su estado líquido.

Clinquer: Producto que está constituido principalmente, por silicatos cálcicos. Se obtiene por calentamiento hasta una temperatura que no podrá ser inferior a la temperatura de fusión incipiente de una mezcla homogénea finamente molida en proporciones adecuadas, formada principalmente por óxidos de calcio y silicio y por óxidos de aluminio y hierro en proporciones menores.

Durabilidad: periodo transcurrido entre la puesta en servicio y el instante en el que deja de cumplir satisfactoriamente las funciones para las cuales ha sido diseñado.

Fracción defectuosa: Fracción, expresada en porcentaje o en fracción decimal, de los resultados menores que un valor especificado.

Granulometría: Distribución porcentual en masa seca de los distintos tamaños de partículas (granos) que constituyen un árido.

Hormigón: Material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava, cemento, eventualmente aditivos y adiciones, en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia.

Muestra: Fracción de hormigón extraída de una amasada.

Nivel de confianza: Fracción, expresada en porcentaje o en fracción decimal, de resultados iguales o mayores que un valor especificado.

Pascal: Unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma.

Permeabilidad: Capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atravesase sin alterar su estructura interna. En este estudio cuando se utiliza ésta palabra se refiere a permeabilidad al agua.

Probeta: Muestra sometida a diversos ensayos mecánicos para estudiar la resistencia de un material.

Probetas compañeras: Probetas confeccionadas de una misma muestra, conservadas y ensayadas en idénticas condiciones.

Resistencia característica: Valor calculado estadísticamente a partir de los resultados obtenidos en los ensayos que corresponde a un nivel de confianza determinado, considerando una distribución normal.

Resistencia de dosificación: Valor medio estimado de los resultados de la resistencia mecánica que se necesita para satisfacer la resistencia especificada.

Resistencia especificada: Resistencia establecida en el proyecto sobre probetas normal con un determinado nivel de confianza.

Resistencia mecánica: Tensión máxima que soporta el hormigón, se expresa en MPa.

Resistencia media del hormigón: Promedio aritmético de los resultados de la resistencia mecánica del hormigón de un mismo grado y edad.

Resultado: Valor obtenido del ensayo o del promedio de los ensayos realizados sobre una muestra, que sirve para medir una propiedad del hormigón.

Superplastificante: Material que mediante su acción fluidificante otorga una alta docilidad o, permite una gran disminución del agua libre para una docilidad dada.

Tamaño máximo absoluto de un árido: Corresponde a la abertura del menor tamiz de las series establecidas en NCh165, que deja pasar el 100% de la masa del árido.

Tamaño máximo nominal de un árido: corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor que el tamaño máximo absoluto cuando por dicho tamiz pase el 90% o más de la masa de un árido. Cuando pasa menos del 90%, el tamaño máximo nominal se considera igual al tamaño máximo absoluto.

Lista de Abreviaturas

A.N.: Árido natural.

A.R.: Árido reciclado.

AHD: Antes de ciclo hielo-deshielo.

ASTM: American Society of Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).

cm.: Centímetro.

CSI: Cement Sustainability Initiative (Iniciativa de Sustentabilidad del Cemento).

Da: Tamaño máximo absoluto de un árido.

DHD: Después de ciclo hielo-deshielo.

Dn: Tamaño máximo nominal de un árido.

fc: Resistencia especificada a compresión.

fk: Resistencia característica.

fr: Resistencia de dosificación.

HAd: Hormigón con aditivo incorporador de aire.

HAR: Hormigón con árido reciclado.

HC: Hormigón control.

HD: Hielo-deshielo

máx: Máximo

mm.: Milímetros.

MPa: Mega Pascal.

NCh: Norma chilena.

Of.: Oficial.

Pa: Pascal.

tam: Tamaño

Lista de Figuras

Figura 5.1 Índice de serviciabilidad vs tiempo	21
Figura 5.2 Composición estructural del hormigón con árido reciclado	26
Figura 6.1 Morfología de los áridos	30
Figura 6.2 Distribución granulométrica arena	31
Figura 6.3 Distribución granulométrica grava 20mm (izq) y 40mm (der).....	32
Figura 6.4 Probetas ensayadas y descartadas	32
Figura 6.5 Obtención de árido reciclado	33
Figura 6.6 Distribución granulométrica A.R 20mm. (izq) y 40mm. (der).....	34
Figura 6.7 Distribución granulométrica para HC 20 y HAd 20	37
Figura 6.8 Distribución granulométrica de HAR 20-25% y HAR 20-50%.	37
Figura 6.9 Distribución granulométrica de HAR 20-75% y HAR 20-100%	38
Figura 6.10 Distribución granulométrica del hormigón HC 40 y HAd 40	39
Figura 6.11 Distribución granulométrica de HAR 40-25% y HAR 40-50%	39
Figura 6.12 Distribución granulométrica de HAR 40-75% y HAR 40-100%	40
Figura 6.13 Materiales pesados y separados.	41
Figura 6.14 Moldes para probetas	42
Figura 6.15 Betonera vertical.	43
Figura 6.16 Ciclo de hielo-deshielo en laboratorio.....	44
Figura 7.1 Probeta con aditivo (izq.) y probeta sin aditivo (der.)	45
Figura 7.2 Fisura producida por ciclo hielo deshielo en HC 20.	45
Figura 7.3 Fisura producida por ciclos hielo deshielo en HC 20.....	46
Figura 7.4 Asentamiento de cono Hormigones tam. máx. 20mm.....	47
Figura 7.5 Aire en estado fresco para Hormigones tam. máx. 20mm.	48
Figura 7.6 Asentamiento de cono Hormigones tam. máx. 40mm.....	48
Figura 7.7 Aire en estado fresco para Hormigones tam. máx. 40mm.	49
Figura 7.8 Asentamiento para Hormigones patrón.	50
Figura 7.9 Aire en estado fresco para Hormigones patrón.	50
Figura 7.10 Resistencia a compresión en hormigones tam. Max. 20mm.....	51
Figura 7.11 Resistencia a la compresión en hormigones tamaño máx. 40 mm.	52
Figura 7.12 Resistencia a la compresión HC y HAd con tamaño máx. 20 y 40mm.	53
Figura 7.13 Permeabilidad hormigón con tamaño máximo 20mm.	54
Figura 7.14 Permeabilidad hormigón con tamaño máximo 40mm.	55
Figura 7.15 Penetración de agua en hormigones patrón.....	56

Figura 7.16 Gráfico cantidad A.R. vs Tamaño máximo AHD.....	59
Figura 7.17 Gráfico cantidad A.R. vs Tamaño máximo DHD.	60
Figura 7.18 Dif Comp, interacción entre cantidad A.R. y Tamaño Máx.....	61
Figura 7.19 Permeabilidad al agua AHD.....	62
Figura 7.20 Permeabilidad al agua DHD.	63
Figura 7.21 Dif Perm, interacción entre cantidad A.R. y Tamaño Máx (AB).	64
Figura 8.1 Esquema microestructura de HAR.	66
Figura 8.2 Evolución micro fisuras en HAR.	67

Lista de Tablas

Tabla 6.1 Factorial experimental	29
Tabla 6.2 Granulometría Arena.....	30
Tabla 6.3 Granulometría gravilla 20 mm.....	31
Tabla 6.4 Granulometría grava 40 mm.	31
Tabla 6.5 Granulometría A.R. 40 mm.	34
Tabla 6.6 Granulometría A.R. 20 mm.	34
Tabla 6.7 Propiedades físicas de los áridos utilizados en el estudio.....	35
Tabla 6.8 Características aditivo incorporador de aire	36
Tabla 6.9 Granulometría hormigón con árido tam. Máx. 20mm.	36
Tabla 6.10 Granulometría hormigón con árido tam. Máx. 40mm.	38
Tabla 6.11 Dosificación hormigón tamaño máximo 20 mm.	40
Tabla 6.10 Dosificación hormigón tamaño máximo 40 mm.	41
Tabla 7.1 Propiedades del hormigón en estado fresco	47
Tabla 7.2 Asentamiento de como Hormigones patrón.....	49
Tabla 7.3 Resistencia a la compresión para hormigones con distintos tratamientos.	51
Tabla 7.4 Comparación resistencia a la compresión entre HC y HAd.....	53
Tabla 7.5 Comparación permeabilidad antes y después de ciclos hielo-deshielo.	54
Tabla 7.6 Comparación penetración de agua en hormigones patrón.....	56
Tabla 7.7 Mediciones recolectadas.....	57
Tabla 7.8 Análisis de varianza (ANOVA) Compresión AHD.	58
Tabla 7.9 Análisis de varianza (ANOVA) Compresión DHD.	59
Tabla 7.10 Análisis de varianza (ANOVA) Diferencia Compresión (Dif Comp).	60
Tabla 7.11 Análisis de varianza (ANOVA) Permeabilidad al agua AHD (Perm AHD).	62
Tabla 7.12 Análisis de varianza (ANOVA) Permeabilidad al agua DHD (Perm DHD).	63
Tabla 7.13 Análisis de varianza (ANOVA) Diferencia Permeabilidad (Dif Perm).	64
Tabla 11.1 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 20mm antes H-D.	76
Tabla 11.2 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 40mm antes H-D.	77
Tabla 11.3 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 20mm antes de H-D.	78
Tabla 11.4 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 40mm antes H-D.	79
Tabla 11.5 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 20mm después H-D.	80
Tabla 11.6 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 20mm después H-D.	81
Tabla 11.7 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 40mm después H-D.	82
Tabla 11.8 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 40mm después H-D.	83

Tabla 11.9 Permeabilidad en hormigón árido tamaño máx. 20mm antes H-D.....	84
Tabla 11.10 Permeabilidad hormigón árido tam- máx. 40mm antes H-D.....	85
Tabla 11.11 Permeabilidad en hormigón árido tam. máx. 20mm después H-D.	86
Tabla 11.12 Permeabilidad en hormigón arido tam. máx. 40mm DH-D.	87
Tabla 11.13 Control ciclos hielo-deshielo	88

1. Antecedentes Generales

Los residuos de la construcción generalmente no se consideran un problema público, al no ser residuos tóxicos o peligrosos, pero, el hormigón forma parte muy participativa en desechos industriales y públicos generados anualmente a nivel mundial (Chauveinc, 2011).

Según la Cement Sustainability Initiative (CSI) (2009), después del agua, el hormigón es el material más utilizado en el mundo. Poon et al. (2001) realizó estudios en Hong Kong mostrando que el 55% de escombros generados por el rubro de la construcción son hormigón armado y hormigón sin armar. En Chile, ocurre algo similar, aunque no hay datos precisos sobre la cantidad generada de residuos provenientes de la actividad de la construcción. El Ministerio del medio ambiente (2011), estima en su informe del estado del medio ambiente, que el sector industrial produce 10,4 millones de toneladas de residuos siendo el 56% perteneciente a la industria de la construcción. Por otra parte la Comisión Nacional del Medio Ambiente estima que se generan 26000 m3 de escombros solamente en la región de la Araucanía (Montoya et al., 2005).

La Incorporación de árido reciclado en el hormigón ha sido tema de estudio desde el año 1950 y hace 20 años aumentaron de forma significativa las investigaciones a este respecto evaluando las propiedades de hormigones con áridos reciclados. Aguilar et al. (2005); Montoya et al. (2005); Rakshvir and Barai (2006), entre otros, investigaron sobre las propiedades físico-mecánicas del hormigón con árido reciclado, con estos estudios demostraron que la utilización de árido reciclado, en proporciones racionales es viable. Ellos demostraron en sus investigaciones que el uso de árido reciclado al fabricar nuevo hormigón tiende a debilitarlo y disminuir sus propiedades de resistencia. Por otra parte, el estudio de Tam et al., 2005, muestra la factibilidad y la utilidad de modificar el proceso de mezclado para mejorar la resistencia del hormigón elaborado con árido reciclado

Gómez (2002), demostró que hormigones con árido reciclado tienen una micro estructura diferente, teniendo estos una porosidad mayor que los hormigones convencionales; Poon et al. (2004) en su estudio concluye que el árido reciclado afecta la micro estructura del hormigón. La resistencia en estos hormigones la cual se ve afectada por sus poros (Cánovas, 2007) se logra mediante el efecto combinado de la delgada capa de pasta de cemento y la transmisión de esfuerzos por contacto entre los áridos (Fernández et al., 2000).

También se debe considerar la reducción de extracción de agregados pétreos de los entornos naturales, esto con el fin de disminuir el impacto al medio ambiente y el agotamiento acelerado de las reservas naturales de áridos provenientes de canteras o de cauces naturales (Rakshvir y Barai, 2006) ,el árido debido a su gran demanda como componente principal en el hormigón, genera una preocupación por preservar y proteger el medio ambiente de un pronto desequilibrio ecológico (Aguilar et al., 2005). En Santiago de Chile, se estimó que el consumo de áridos para el 2005 sería de 13,4 millones de m3 (Comisión de Nacional Áridos, 2001), lo que puso en riesgo el abastecimiento desde las reservas en esta región.

La reutilización de materias primas, hoy en día, está ganando cada vez más importancia, la reutilización de los desechos producidos para incorporarlos a la elaboración de otros productos, como es en éste caso los escombros que produce la industria de la construcción (Poon et al., 2002), para así hacer el proceso de fabricación de hormigón más amigable con el medio ambiente y a la vez que se reducen los grandes volúmenes de desechos, reduciendo costos de extracción y producción (Spiegel y Meadows, 2002). Esto va de la mano con el concepto de sustentabilidad que significa más

que reducir el impacto ambiental. Sustentabilidad significa crear lugares que sean ambientalmente responsables, saludables, justos, equitativos y rentables (U.S. Green Building Council, 2010), de ésta forma ya nace la visión de ser más eficientes con la utilización de los recursos que se disponen en la industria de la construcción. También, acá en Chile ha llegado éste concepto, creándose el 2008 una estrategia nacional de construcción sustentable (MINVU, 2014) en donde se apunta a generar procesos en la industria de la construcción chilena que disminuyan el impacto al medio ambiente y hacer más eficientes los procesos de producción o extracción de materias primas.

Con los antecedentes expuestos de la utilización del árido reciclado en la fabricación de hormigones convencionales, nace la necesidad de verificar el comportamiento del hormigón con árido reciclado en condiciones especiales, en este caso, ciclos hielo-deshielo.

En los ciclos hielo-deshielo, la durabilidad del hormigón se ve afectada por la temperatura (Menéndez, 2005). Se han encontrado parámetros que afectan dentro de la estructura química del cemento a partir de los ciclos de enfriamiento y merman de manera drástica la durabilidad del hormigón (Pigeon y Pleau, 1995).

Un ciclo hielo- deshielo constituye uno de los agentes agresores más destructivos del hormigón, ya que involucra y afecta tanto la pasta de cemento y los agregados individualmente como en conjunto (Menéndez, 2005), por esto generalmente se implementan aditivos incorporadores de aire para mejorar su comportamiento frente a este tipo de fenómenos (Lomboy y Wang, 2009).

De esto se desprende la siguiente interrogante, ¿Es posible dosificar un hormigón con árido reciclado que no requiera de aditivos químicos y que sea durable frente a ciclos hielo-deshielo?

Por esto, con este estudio, se evalúa el comportamiento del hormigón elaborado con árido reciclado en distintas proporciones de árido reciclado, expuesto frente a ciclos hielo deshielo. Para analizar su comportamiento y determinar si su desempeño es mejor que un hormigón con aditivo incorporador de aire.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la durabilidad del hormigón fabricado con árido reciclado expuesto frente a ciclos hielo-deshielo

2.2 Objetivos Específicos

- a. Determinar la influencia que el tamaño máximo del árido reciclado tiene en la permeabilidad al agua de hormigones expuestos a ciclos-deshielo.
- b. Determinar la influencia que el contenido del árido reciclado tiene en la permeabilidad al agua de hormigones expuestos a ciclos hielo-deshielo.
- c. Comparar la permeabilidad de un hormigón con árido reciclado y un hormigón con aditivo incorporador de aire.

3. Alcances

Esta investigación se desarrolló en los laboratorios de docencia pertenecientes a la Escuela de Construcción civil de la Universidad de Valparaíso, ubicados en Playa Ancha, V región de Valparaíso, Chile.

De acuerdo a la información recopilada de los estudios previos a ésta investigación, se utilizó solamente la fracción gruesa del árido reciclado para la elaboración de los hormigones,

El cemento utilizado en este estudio es un cemento con agregado tipo A, grado corriente, de acuerdo con la NCh 148 Of 98, de la marca Polpaico.

El árido grueso de hormigón reciclado es procedente de probetas cubicas y cilíndricas descartadas luego de ser ensayadas en el laboratorio de la Universidad de Valparaíso.

Los áridos naturales (gruesos y finos) usados como material proceden de Río Aconcagua.

El aditivo incorporador de aire utilizado, será TamCem AE200, de la línea de productos Normet dedicados a la fabricación de hormigones.

El equipo utilizado para realizar los ciclos hielo-deshielo, es un congelador doméstico con capacidad de 300 Litros, de marca Mademsa.

Las probetas de hormigón se ensayaron a la edad de 28 días y luego de 50 ciclos hielo-deshielo.

4. Hipótesis

“Al aumentar el contenido y el tamaño máximo del árido reciclado (A.R), aumenta la durabilidad del hormigón.”

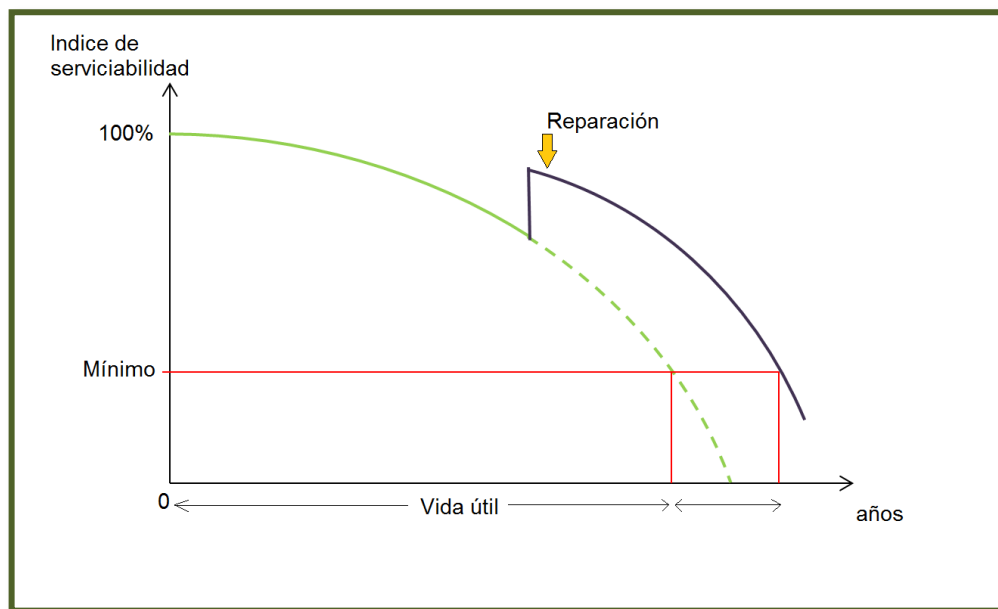
5. Marco Teórico

5.1 Durabilidad

El concepto de durabilidad de un elemento o de una estructura, está directamente relacionado con su tiempo de vida útil, entendiéndose como tal, al periodo transcurrido entre la puesta en servicio y el instante en el que deja de cumplir satisfactoriamente las funciones para las cuales ha sido diseñado, lo que en estructuras o elementos de hormigón.

Al entrar en servicio puede asumirse que una estructura tiene un índice de serviciabilidad de 100%, es decir, cumple cabalmente los requerimientos considerados en su diseño, sin embargo el tiempo y las condiciones de servicio necesariamente van generando un deterioro acumulativo que reduce progresivamente dicho índice, como se muestra en la Figura 5.1 la estructura puede repararse antes de que alcance el nivel de deterioro irrecuperable, lógicamente recuperando el índice de serviciabilidad y su vida útil se prolonga. De lo contrario, si alcanza el límite de deterioro irrecuperable, deja de cumplir satisfactoriamente las funciones para la que ha sido diseñada y resulta económicamente inviable su reparación, lo que implica que ha alcanzado el término de su vida útil (Solas y Giani, 2010).

Figura 5.1 Índice de serviciabilidad vs tiempo



Fuente: Tecnología del Hormigón Avanzada, 2010.

5.2 Ciclo Hielo-Deshielo

Según Solas y Giani (2010) y Shang et al. (2009) la principal causa del deterioro progresivo del hormigón, sujeto a ciclos hielo-deshielo, proviene del hecho que el agua difunde desde zonas no congeladas hacia zonas congeladas, producto de la existencia de un potencial de osmosis originado por la distinta concentración de sales contenidas en la solución intersticial respecto del hielo y por la expansión generada por el mismo, lo que termina saturando los capilares con hielo y solución, dando origen a presiones capaces de generar micro fisuras, la dirección y distribución de las micro fisuras es estocástica, las cuales a medida que los ciclos hielo-deshielo se repiten terminan formando un patrón de fisuras que se extienden, ensanchan progresivamente y propagan más rápido con las cargas de servicio en el hormigón.

Por otra parte, Solas y Giani (2010), explican que a menor diámetro, menor es la temperatura de congelamiento, llegando a un punto en que los cristales no pueden formarse y por ende el agua no se puede congelar.

También Solas y Giani (2010) exponen que el grado de deterioro del hormigón por efecto de formación de hielo en su masa depende de:

- La edad del hormigón, ya que ésta determina el grado de hidratación y consecuentemente la porosidad.
- La distribución y tamaño de los poros.
- Las condiciones ambientales que determinan la posibilidad de evaporación del agua.
- La velocidad de enfriamiento y frecuencia de los ciclos hielo-deshielo, debido al problema de redistribución del agua en los capilares, puesto que el agua no alcanza a llegar al poro y dado que el capilar tiene un menor espacio, el agua al congelarse genera presiones internas en esa zona lo cual crea fisuras internas en el hormigón.

5.3 Árido Reciclado

Se entiende por árido reciclado el árido que ha sido obtenido del procesamiento de residuos de construcción y demolición. En función a la naturaleza de los desechos de origen, los áridos reciclados se pueden clasificar en áridos procedentes de hormigón, áridos reciclados cerámicos o áridos mixtos cuando provienen de residuos de distinta naturaleza.

Árido reciclado de hormigón es, como su nombre lo indica, el árido producto del procesamiento de escombros de hormigón, en su mayoría contiene árido de hormigón y mortero adherido.

El árido reciclado afecta principalmente el módulo elástico del hormigón, también su densidad es menor comenta Sánchez (2004).

Su granulometría depende fundamentalmente del tipo de trituración realizada en el procesamiento y la calidad del hormigón original explica Sánchez (2004).

La utilización del árido reciclado nace de la voluntad de preservar el medioambiente tanto para disminuir el volumen de escombros generados, que puedan causar contaminación, disminución acelerada en la capacidad de vertederos y rellenos sanitarios, como también para reducir la extracción de áridos naturales, generando procesos más eficientes y sustentables para generar áridos reciclados de mejor calidad y aportar de forma eficiente al entorno.

5.4 Estudio del árido reciclado en el hormigón

Desde el año 1950 se comienzan a estudiar las propiedades del árido reciclado. Aumentando de manera significativa los últimos 20 años, Ajdukiewicz y Kliszczewicz (2002) informan que las propiedades del hormigón original influyen las propiedades mecánicas del hormigón con áridos reciclados y que es posible obtener un hormigón con árido reciclado de mayor resistencia que el hormigón original.

Por otra parte Katz (2003) afirma que cuando el árido reciclado es de menor resistencia que el nuevo hormigón producido, tiende a debilitarse debido al árido reciclado de menor resistencia.

Por otro lado, las investigaciones de Poon et al. (2004); Topçu and Şengel (2004); Tu et al. (2006); Martínez-Soto y Mendoza-Escobedo (2006); Rahal (2007); Casuccio et al. (2008); Padmini et al. (2009) concluyen que el árido reciclado empeora las propiedades del hormigón fabricado con árido reciclado. Sin embargo Aguilar et al. (2005); Montoya et al. (2005); Rakshvir y Barai (2006); Sánchez y Alaejos Gutiérrez (2006); Topçu (1997); Topçu y Günçan (1995); Topçu y Şengel (2004), establecen que el árido reciclado no afecta las propiedades mecánicas del hormigón si las dosis de árido reciclado entre los rangos 10% - 26%, de esta manera el uso del árido reciclado es viable sin afectar considerablemente las propiedades mecánicas del hormigón, si se utiliza dentro del rango antes mencionado.

También Chen et al. (2003) informa la posibilidad de utilizar árido reciclado que contenga ladrillo y elementos cerámicos, pero esto reduciría las propiedades mecánicas del hormigón.

Por otra parte Zaharieva et al. (2004), concuerda con Aguilar et al. (2005) y Brito et al. (2006) en que uno de los grandes obstáculos de los áridos reciclados es la absorción de agua, Comprobando lo establecido por Topçu (1997), que describe en su investigación que a mayor contenido de árido reciclado, menor será el cono de asentamiento, esto debido a la mayor absorción de agua por parte del árido reciclado

También, varios autores señalan que hormigones con árido reciclado tienen una micro estructura diferente, teniendo estos una porosidad mayor que los hormigones convencionales (Gómez (2002); Poon et al. (2004); Tam et al. (2005); Etxeberria et al. (2007)), la resistencia en estos hormigones la cual se ve afectada por sus poros (Cánovas, 2007) se logra mediante el efecto combinado de la delgada capa de pasta de cemento y la transmisión de esfuerzos por contacto entre los áridos (Fernández et al., 2000).

Según Aguilar et al. (2005), a mayor porcentaje de árido reciclado en el hormigón, menor es la densidad en estado fresco y menor es su resistencia.

Otros reportes señalan que aunque el material fino reciclado puede ser usado, éste tendería a tener una baja trabajabilidad y una elevada absorción, haciendo necesaria una demanda de agua difícil de predecir (Hansen y Narud, 1983), con estos antecedentes los autores recomiendan utilizar sólo la fracción gruesa del árido reciclado.

Poon et al. (2002), Ismail y Mahyuddin (2014), Gokce et al. (2004) y Pavón et al. (2011), realizan el reemplazo del árido reciclado en peso. Por otra parte Kou et al. (2014), Gonzalez-Corominas y Etxeberria (2014), Kou y Poon (2012), Cakir (2014) efectúan el reemplazo en volumen. Teniendo en cuenta el método de reemplazo de árido reciclado que utilizan éstos autores. En esta investigación, el reemplazo se hizo en peso teniendo en consideración las densidades de los áridos.

De acuerdo a lo señalado por Meyer (2009) el rango de la disminución de la resistencia en un hormigón fabricado con árido grueso reciclado varía, entre un 5% - 24%, comparado con un hormigón fabricado con árido natural y si se reemplaza tanto árido fino como grueso por árido reciclado las reducciones de resistencia fluctúan entre el 15% al 40%, en comparación con un hormigón fabricado con árido natural.

De acuerdo con esto, Aguilar et al. (2005), agrega que estas propiedades se pueden mejorar agregando más cemento del que arrojó la dosificación original, a modo de corrección y Tam et al. (2005) mostró la posibilidad de modificar el proceso de mezclado para mejorar aquellas propiedades del hormigón reciclado.

Zaharieva et al. (2004), sugiere utilizar aditivos plastificantes o súper plastificantes para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, como también sugiere saturarlos de agua para que así no absorban el agua de la mezcla.

5.5 Exposición a ciclos hielo-deshielo y durabilidad

La resistencia del agregado reciclado frente a ciclos hielo deshielo, todavía es cuestionable debido a la gran diversidad, calidad y composición de los hormigones de demolición (Gokce et al., 2004).

Según Dillmann (1998), lo que determinó que el efecto en la resistencia de los hormigones con un cierto contenido de árido natural reemplazado por árido reciclado, expuestos a ciclos hielo deshielo, dependía de la fuente de éstos A.R. Aquí los autores notan que no hay diferencia notable en la durabilidad del hormigón con árido reciclado frente a ciclos hielo deshielo, con respecto a la resistencia del hormigón que fue reciclado.

Forster, Moore et al. (1994), reportan que el comportamiento de A.R. frente a ciclos hielo-deshielo, dependen del tipo de árido. Hormigón con árido susceptible a ciclos hielo deshielo, tiene un mejor comportamiento cuando éste árido se utiliza como árido reciclado.

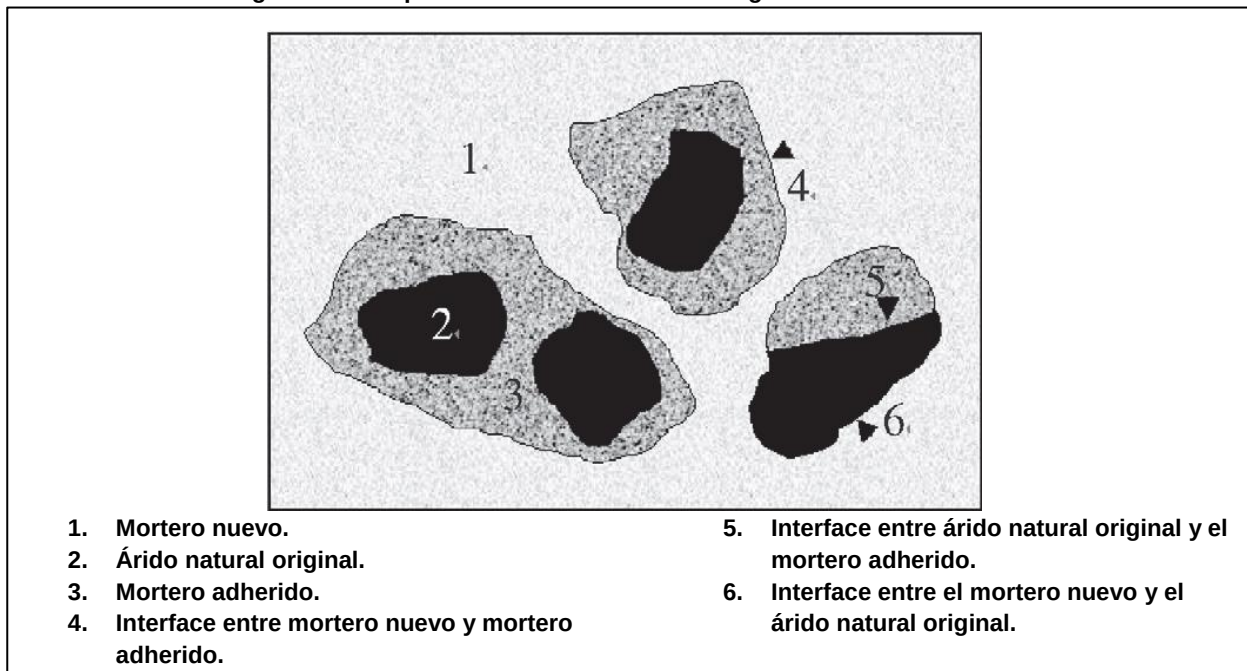
Yamato et al. (1988) Investigaron la resistencia frente a ciclos hielo deshielo de los hormigones fabricados con árido reciclado producidos por una planta. Llegando a la conclusión que la resistencia de éstos hormigones era menor que la del hormigón de control. Para sustitución de árido reciclado menor a 30%, la reducción en la resistencia frente a ciclos hielo deshielo era pequeña.

En una investigación, Hosokawa et al. (1997) ,estudiaron la influencia del mortero adherido en el árido reciclado y su desempeño expuesto a ciclos hielo deshielo, esto no generó un efecto claro en cómo reducía su resistencia, obteniendo resultados que decían si la calidad del hormigón reciclado era alta, el mortero adherido al árido no influía de manera negativa en la resistencia frente a ciclos hielo deshielo.

Comparado con el árido natural, el árido reciclado, incorpora al nuevo hormigón tres diferentes tipos de zonas de transición en la interface (Gokce, 2001).

La Figura 5.2 expone una representación de la nueva composición estructural del hormigón elaborada por Gokce et al. (2004) en su investigación sobre el comportamiento del árido reciclado con aire incorporado cuando se agrega árido reciclado en su fabricación.

Figura 5.2 Composición estructural del hormigón con árido reciclado



Fuente: Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete, 2004.

Observaciones de Kawamura y Torii (1988) en la superficie desintegrada del hormigón de árido reciclado, frente a ciclos hielo deshielo con agregado susceptible al congelamiento, indicaron que ocurrió un deterioro a lo largo de la interface entre el mortero y el árido reciclado o con el mortero adherido. Su recomendación es reducir el mortero adherido al árido reciclado lo más posible.

Nishibayashi y Yamura (1988), descubren que la durabilidad del hormigón con árido reciclado es menor y no puede mejorarse con inclusión de aire.

Por lo tanto se pueden identificar las variables que interfieren en la investigación, como lo es el mortero adherido al árido reciclado, la absorción de agua elevada por parte de los áridos reciclados, el tamaño máximo del árido influye en la formación de vacíos, la fracción fina del agregado no es recomendable utilizarla y que la zona de mayor vulnerabilidad para la durabilidad del hormigón fabricado con árido reciclado, es la interface de transición entre el mortero nuevo con el mortero viejo.

5.6 Aditivo Incorporador de aire

Están destinados a producir la incorporación de aire en forma de pequeñas burbujas, en su mayoría de un tamaño comprendido entre 0.01 y 1 mm, con una distribución uniforme de las masas del hormigón. La proporción de burbujas recomendable depende del tamaño máximo del árido más grueso del hormigón.

El empleo de los incorporadores de aire está orientado básicamente a aumentar la durabilidad del hormigón frente a los ciclos hielo – deshielo.

Sin embargo, también tienen efecto sobre otras propiedades del hormigón, entre las cuales se citan las siguientes:

- Reducción de la permeabilidad del agua y líquidos en general.
- Aumento de la fluidez del hormigón.
- Disminución de la exudación del agua de amasado del hormigón.
- Disminución de la resistencia, debido a la presencia de micro burbujas generadas por el aditivo incorporador de aire.

Este último efecto debe ser especialmente considerado, pues la disminución de la resistencia provocada por la incorporación de burbujas no alcanza a ser compensada por la disminución de la cantidad de agua de amasado.

Su efecto frente a los ciclos hielo – deshielo consiste en que las burbujas de aire incorporado en el hormigón actúan como cámaras de expansión frente al aumento de volumen que experimenta el agua al transformarse en hielo. Ello permite reducir las presiones hidráulicas y, con ello, las tensiones internas que se originan, por este motivo impiden el deterioro progresivo en el tiempo, que se producirá en el hormigón que no contenga aire incorporado.

Los principales ingredientes que se utilizan en los aditivos incorporadores de aire según la ASTM C260 (American Society of Testing and Materials) se mencionan a continuación: Sales de resinas de madera (resina Vinsol), Algunos detergentes sintéticos, Sales de lignina sulfonatada, Sales de ácidos de petróleo, Sales de material proteináceo, Ácidos grasos y resinosos y sus sales, Sulfonatos de alquilbenceno, Sales de hidrocarburos sulfonados. Las especificaciones así como los métodos de ensaye para los aditivos incorporadores de aire se presentan en las normas ASTM C 260 y C 233. Los aditivos incorporadores de aire que se emplean en la fabricación de hormigones con aire incluido, deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 226.

6. Metodología de Trabajo

6.1 Introducción

Esta metodología permitirá a comparar la durabilidad, resistencia a compresión y permeabilidad al agua de un hormigón expuesto a ciclos hielo deshielo con distintas dosis de árido reciclado (A.R.) en reemplazo de árido natural (A.N.) y con distinto tamaño máximo de árido grueso, para determinar cuál de los hormigones con A.R. diseñados tiene el mejor comportamiento luego de ser sometidos a ciclos hielo-deshielo.

De acuerdo con la bibliografía expuesta en el marco teórico, se determina que solamente la fracción gruesa del árido reciclado se utilizará en éste estudio y el reemplazo de árido natural por árido reciclado se hará en peso considerando las densidades de los áridos.

En éste estudio se utilizó el término árido reciclado (A.R.), para denominar al árido reciclado de hormigón y para árido natural (A.N.), cuando se haga referencia a otros tipos de áridos se especificará si se trata de áridos reciclados cerámicos o mixtos.

6.2 Diseño de la Experiencia

Esta experiencia se diseñó, tomando en cuenta la presencia de dos hormigones patrones, el primer hormigón patrón con árido natural y el segundo con árido natural y aditivo incorporador de aire. Los hormigones en estudio se dosificaron con distintas proporciones de áridos reciclados. Con esto las variables independientes son:

- Porcentaje de reemplazo de A.R.: Es una variable numérica en un rango de 0% de reemplazo a 100% de reemplazo y en incrementos de 25% de reemplazo. Por lo tanto los niveles de reemplazo son, 0% ; 25% ; 50% ; 75% ; 100%.
- Tamaño máximo del A.R.: Es una variable categórica con dos niveles, 20mm. y 40mm.

Las variables dependientes:

- Cantidad de aire en estado fresco.
- Resistencia a la compresión.
- Permeabilidad.

Cada tipo de hormigón fue asignado con una abreviatura para hacer más fácil su identificación y comparación entre ellos. Las abreviaturas asignadas fueron las siguientes:

- HC : Hormigón control o patrón.
- HAd: Hormigón con aditivo incorporador de aire.
- HAR: Hormigón con árido reciclado.

Luego de esta abreviatura viene el tamaño máximo nominal del árido y el porcentaje de árido reciclado empleado.

Ejemplo, HAR XX-YY%. En donde XX es el tamaño máximo nominal e YY la cantidad de árido reciclado.

La Tabla 6.1 presenta el factorial de diseño del experimento

Tabla 6.1 Factorial experimental

Porcentaje de reemplazo de A.R	Tamaño máximo A.R. (mm)	Porcentaje de aire en estado fresco	Permeabilidad antes de ciclo hielo-deshielo	Permeabilidad después de ciclo hielo-deshielo	Compresión antes de ciclo hielo-deshielo	Compresión después de ciclo hielo-deshielo
0	40	Y	X	X	X	X
Aditivo	40	Y	X	X	X	X
25	40	Y	X	X	X	X
50	40	Y	X	X	X	X
75	40	Y	X	X	X	X
100	40	Y	X	X	X	X
0	20	Y	X	X	X	X
Aditivo	20	Y	X	X	X	X
25	20	Y	X	X	X	X
50	20	Y	X	X	X	X
75	20	Y	X	X	X	X
100	20	Y	X	X	X	X

Fuente: Propia, 2015

Donde:

X: 3 repeticiones.

Y: 1 repetición.

La cantidad total de hormigones confeccionados en ésta evaluación, fueron, 12 hormigones y un total de 144 probetas, para los ensayos de resistencia a la compresión y permeabilidad al agua bajo presión realizados en ésta investigación.

Los hormigones diseñados para esta experiencia, son dosificados según la norma NCh 170 Of.1985, el hormigón patrón fue diseñado con una razón agua cemento de 0,4 de acuerdo a las condiciones de servicio a las cuales estaría sometido el hormigón. Los hormigones con contenido de árido reciclado modifican la dosificación de A.N. del hormigón patrón en un 0% ; 25% ; 50% ; 75% ; 100%. También se confeccionó un hormigón con aditivo incorporador de aire para las posteriores comparaciones, la dosificación utilizada para éste hormigón, es la del hormigón patrón más la cantidad de aditivo.

El reemplazo de A.N. por A.R. es en peso, tomando en cuenta las densidades de los áridos utilizados.

Se confeccionaron probetas de 150mm. de arista, para todos los ensayos de resistencia a la compresión y permeabilidad al agua bajo presión.

La primera ronda de ensayos, se realizó a los 28 días de curado y la segunda ronda, se efectuó luego de 50 ciclos hielo-deshielo.

6.3 Materiales y Métodos

6.3.1 Áridos

Los áridos naturales utilizados en el éste estudio, son producto del chancado de áridos más gruesos, proviniendo éstos de lecho de río. Los áridos presentan una morfología, tipo canto vivo como se muestra en la Figura 6.1.

Figura 6.1 Morfología de los áridos



Fuente: Propia, 2014

En la Tabla 6.2 se muestra la distribución granulométrica de la arena que se utilizará en la experiencia

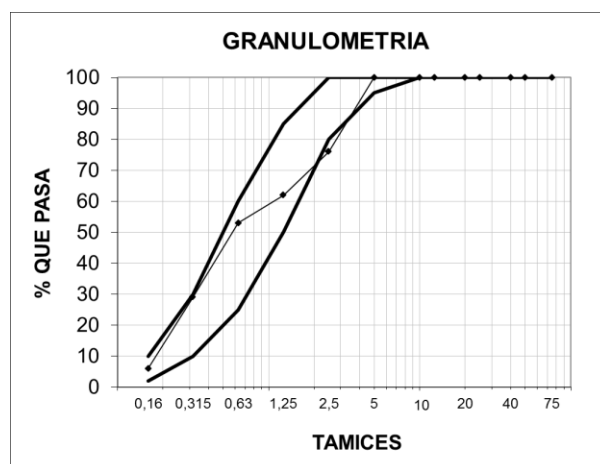
Tabla 6.2 Granulometría Arena

Análisis Granulométrico Arena	
Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
10	100
5	100
2,5	76
1,25	62
0,63	53
0,32	29
0,16	6

Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.2 muestra la distribución entre las bandas establecidas, la arena en el tamiz 2,5mm. Presenta una pequeña desviación en el límite inferior.

Figura 6.2 Distribución granulométrica arena



Fuente: Propia, 2015

La Tabla 6.3 presenta el análisis granulométrico realizado a la gravilla tamaño máximo nominal 20 mm.

Tabla 6.3 Granulometría gravilla 20 mm.

Análisis Granulométrico Gravilla 20 mm	
Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
20	100
12,5	89
10	60
5	4
2,5	1

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 6.4 presenta el análisis granulométrico realizado a la grava tamaño máximo nominal 40mm.

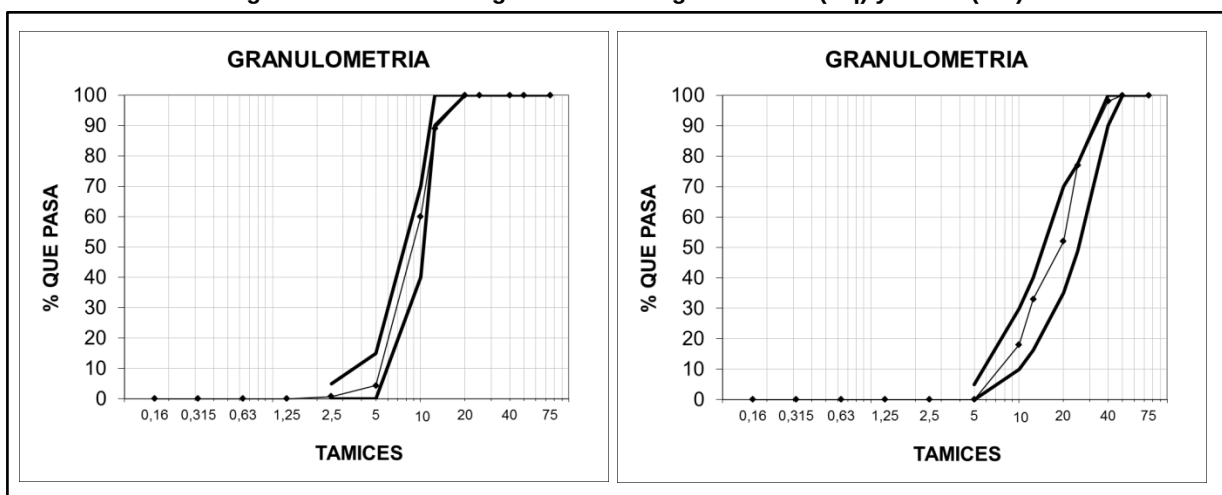
Tabla 6.4 Granulometría grava 40 mm.

Análisis Granulométrico Grava 40 mm.	
Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
50	100
40	98
20	52
12,5	33
10	18
5	0

Fuente: Propia, 2015

En la Figura 6.3 se expone la representación gráfica del análisis granulométrico de grava tamaño máximo nominal 20mm . y 40mm.

Figura 6.3 Distribución granulométrica grava 20mm (izq) y 40mm (der).



Fuente: Propia, 2014

El árido reciclado proviene de la molienda manual de las probetas ya ensayadas y descartadas por parte de los laboratorios de la escuela de construcción civil de la Universidad de Valparaíso. La Figura 6.4 muestra el tipo de probetas que se utilizaron para obtener el árido reciclado.

Figura 6.4 Probetas ensayadas y descartadas



Fuente: Propia, 2015

El proceso de obtención de este árido consistió en golpear la probeta con un mazo de 12 Kg., esto permite que la probeta colapse, provocando que el hormigón libere parte del árido que contiene. Producto de esto el árido que se puede recuperar es árido con cierto contenido de mortero adherido y también partículas hormigón con el tamaño del árido deseado, en la Figura 6.5 aparece el mazo utilizado, y partículas de árido de diversos tamaños.

Figura 6.5 Obtención de árido reciclado



Fuente: Propia, 2015

La recolección del A.R. fue de forma manual y desechando aleatoriamente las partículas excesivamente grandes (mayor a 25mm. aproximadamente), luego de esto, se realiza el proceso de quitar la fracción fina (tamiz 5mm. hacia abajo) mediante el tamizado del volumen de árido reciclado recolectado.

El árido reciclado se caracterizó de la misma forma que los áridos naturales, de acuerdo a la norma NCh 163. Of 1979. El tamaño máximo nominal de A.R es de 40mm. y 20mm., en las tablas 6.5 ; 6.6 y figura 6.6 se presentan los resultados obtenidos.

La Tabla 6.5 presenta el análisis granulométrico realizado al A.R. tamaño máximo nominal 40 mm.

Tabla 6.5 Granulometría A.R. 40 mm.

Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
50	100
40	100
20	89
12,5	48
10	33
5	1

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 6.6 presenta el análisis granulométrico realizado al A.R. tamaño máximo nominal 20mm.

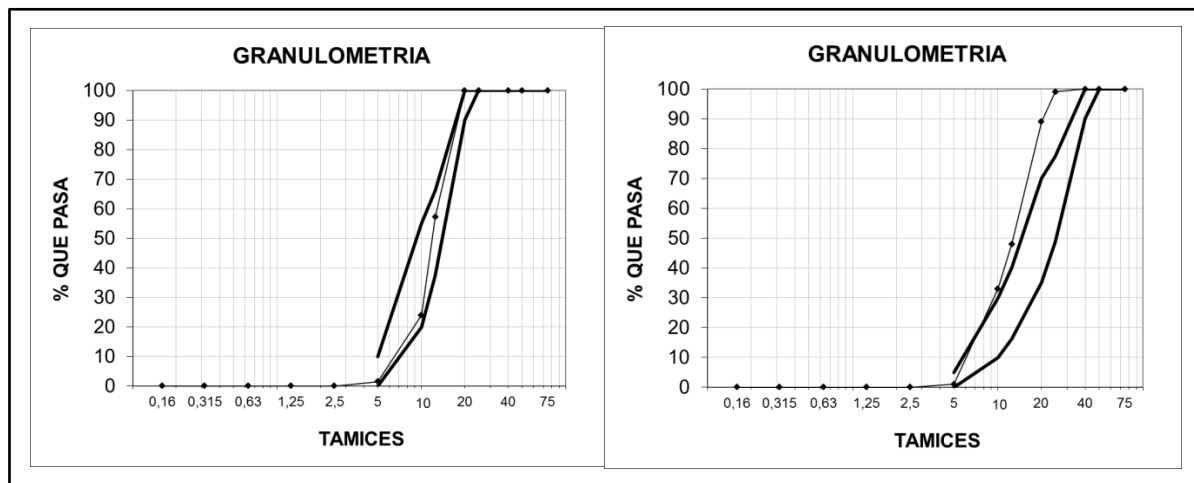
Tabla 6.6 Granulometría A.R. 20 mm.

Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
25	100
20	100
12,5	67
10	47
5	2
2,5	0

Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.6 expone la representación gráfica del análisis granulométrico al A.R tamaño máximo nominal 20mm y 40mm.

Figura 6.6 Distribución granulométrica A.R 20mm. (izq) y 40mm. (der)



Fuente: Propia, 2015

La Tabla 6.7 presenta las propiedades físicas de los áridos que se utilizaron en el estudio. Se Comprueba en la Tabla 6.7, que el A.R. tiene una absorción de agua mucho mayor, comparada con los A.N. como las investigaciones de Zaharieva et al. (2004) y Aguilar et al. (2005) mencionan. También el A.R. presenta una densidad real seca un 17% menor a la del A.N.

Tabla 6.7 Propiedades físicas de los áridos utilizados en el estudio

Tipo	Tamaño máx. nominal (mm.)	ρ_{Rss} (Kg/m ³)	ρ_{RS} (Kg/m ³)	ρ_N (Kg/m ³)	ρ_{as} (Kg/m ³)	ρ_{ac} (Kg/m ³)	α (%)
Arena	5	2.565	2.565	2.676	1.571	1.712	1,63
Gravilla	12,5	2.684	2.647	2.747	1.518	1.616	1,40
Grava	40	2.682	2.646	2.744	1.447	1.549	1,35
Arido reciclado	20	2.400	2.245	2.657	1.390	1.468	6,90
Arido reciclado	40	2.400	2.245	2.657	1.390	1.468	6,90

Fuente: Propia, 2014

6.3.2 Cemento

El cemento utilizado en este estudio, es un cemento con agregado tipo A, grado corriente de la marca comercial Polpaico y el cemento se comercializa bajo el nombre de “Polpaico especial” el agregado tipo A, esto significa que, el cemento en cuya composición entrará en una proporción comprendida entre el 30% y 50% en peso del producto terminado.

Donde el agregado tipo A significa que, es una mezcla de sustancias compuestas de un material calcáreo-arcilloso que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900 °C y otros materiales a base de óxidos de silicio, aluminio y hierro. El contenido de calcio del agregado, expresado como CaO total, fluctuará entre 5% mínimo y 30% máximo, según NCh 148 Of 1968.

El peso específico del cemento utilizado es de 2,95 (Kg/dm³).

6.3.3 Aditivo incorporador de aire

El aditivo incorporador de aire se utilizó en el rango recomendado por el fabricante, 0.1% a 0.5% del peso del cemento. La Tabla 6.8 presenta caracterización del aditivo utilizado entregada por el fabricante.

Tabla 6.8 Características aditivo incorporador de aire

Característica	
Estado a T° ambiente	Líquido
Color	Amarillo claro
Densidad	1,00 ± 0,01 (g/cm ³)
Contenido de Cloruro	< 0,1%
pH	7,0 ± 1,0

Fuente: Normet – TAM CEM AE200 Air-entraining admixture for concrete, 2012

6.4 Dosificación Hormigones

La dosificación utilizada en este estudio, se realizó teniendo en cuenta una resistencia característica de 30 [Mpa], con confiabilidad de 95% y descenso de cono de 8 [cm].

La Tabla 6.9 presenta el detalle de la granulometría comparando el hormigón patrón con los hormigones que contienen árido reciclado con tamaño máximo de partícula 20mm.

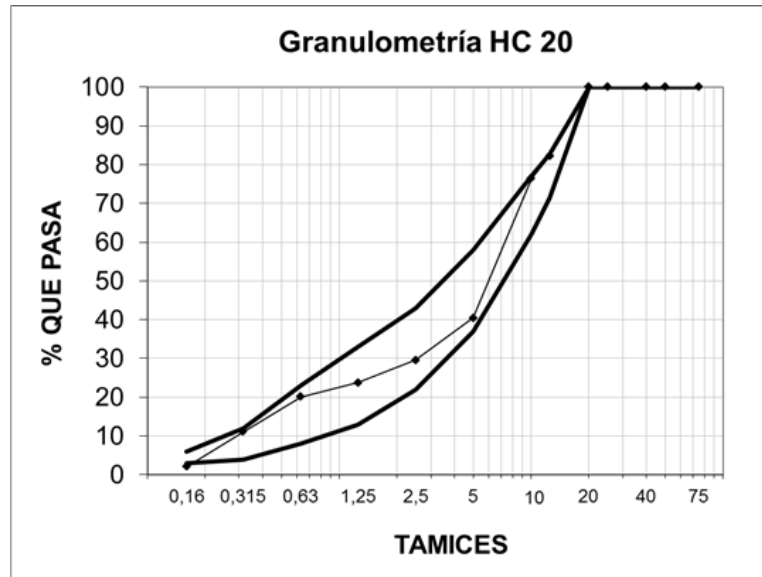
Tabla 6.9 Granulometría hormigón con árido tam. Máx. 20mm.

Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)				
	Árido Combinado tamaño máximo nominal 20mm.				
	HC y HAd	HAR 25%	HAR 50%	HAR 75%	HAR 100%
25	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100
10	76	74	73	71	69
5	40	40	40	40	39
2,5	30	29	29	29	29
1,25	24	24	24	24	24
0,63	20	20	20	20	20
0,315	11	11	11	11	11
0,16	2	2	2	2	2

Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.7 muestra la representación gráfica de la granulometría del árido combinado para el hormigón patrón con tamaño máximo de partícula 20mm. y hormigón con aditivo incorporador de aire con tamaño máximo de partícula 20mm.

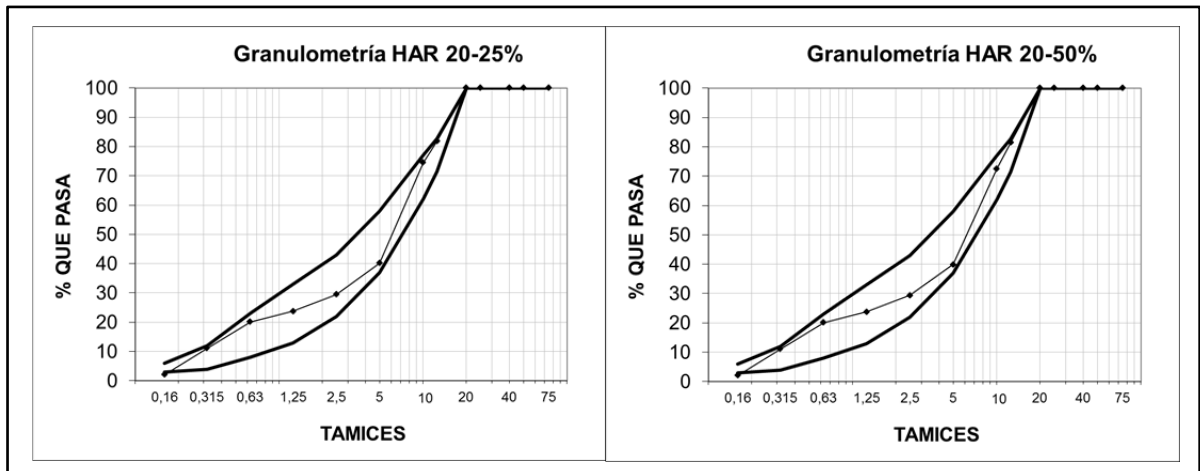
Figura 6.7 Distribución granulométrica para HC 20 y HAd 20



Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.8 expone la representación gráfica de la granulometría del árido combinado para el hormigón con árido reciclado en un 25% y 50% con tamaño máximo de partícula 20mm.

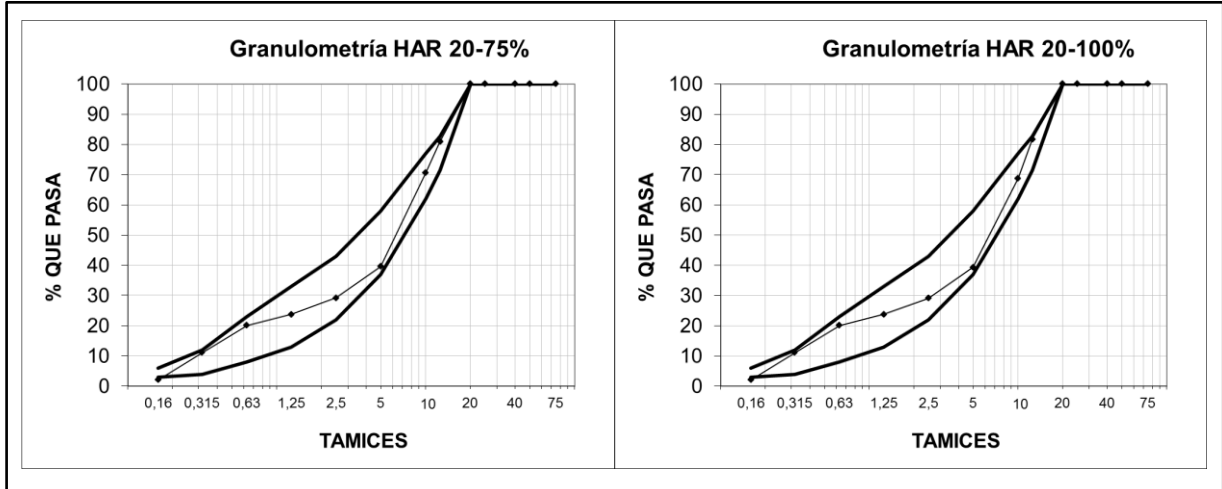
Figura 6.8 Distribución granulométrica de HAR 20-25% y HAR 20-50%.



Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.9 expone la representación gráfica de la granulometría del árido combinado para el hormigón con árido reciclado en un 75% 100% con tamaño máximo de partícula 20mm.

Figura 6.9 Distribución granulométrica de HAR 20-75% y HAR 20-100%



Fuente: Propia, 2015

La Tabla 6.10 presenta el detalle de la granulometría comparando el hormigón patrón con los hormigones que contienen árido reciclado con tamaño máximo de partícula 40mm.

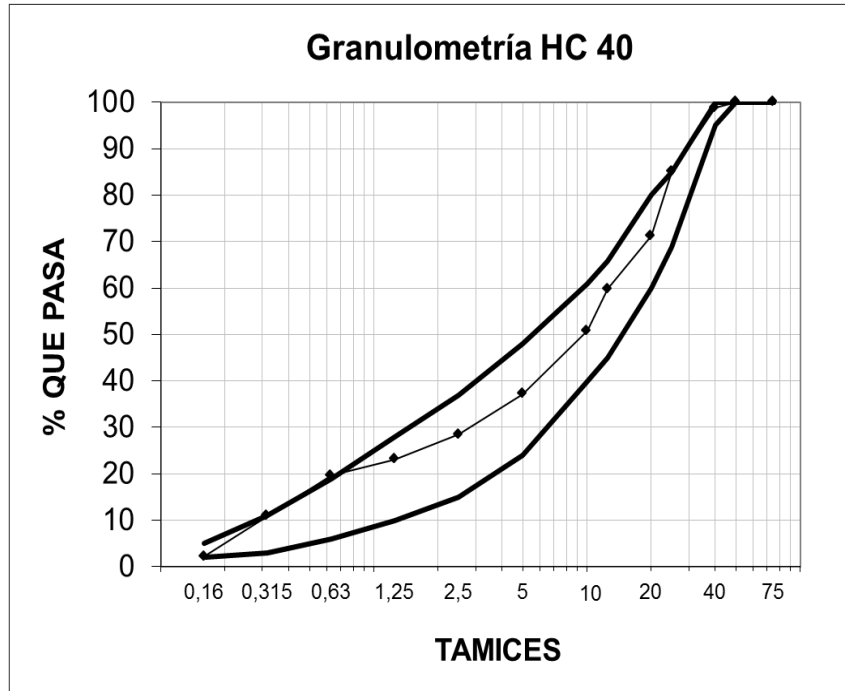
Tabla 6.10 Granulometría hormigón con árido tam. Máx. 40mm.

Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)				
	Arido Combinado tamaño máximo nominal 40mm.				
	HC y HAd	HAR 25%	HAR 50%	HAR 75%	HAR 100%
50	100	100	100	100	100
40	99	97	99	100	100
20	71	77	82	88	93
10	51	53	55	58	60
5	37	37	37	38	38
2,5	28	28	28	28	28
1,25	23	23	23	23	23
0,63	20	20	20	20	20
0,315	11	11	11	11	11
0,16	2	2	2	2	2

Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.10 muestra la representación gráfica de la granulometría del árido combinado para el hormigón patrón con tamaño máximo de partícula 40mm. y hormigón con aditivo incorporador de aire con tamaño máximo de partícula 40mm.

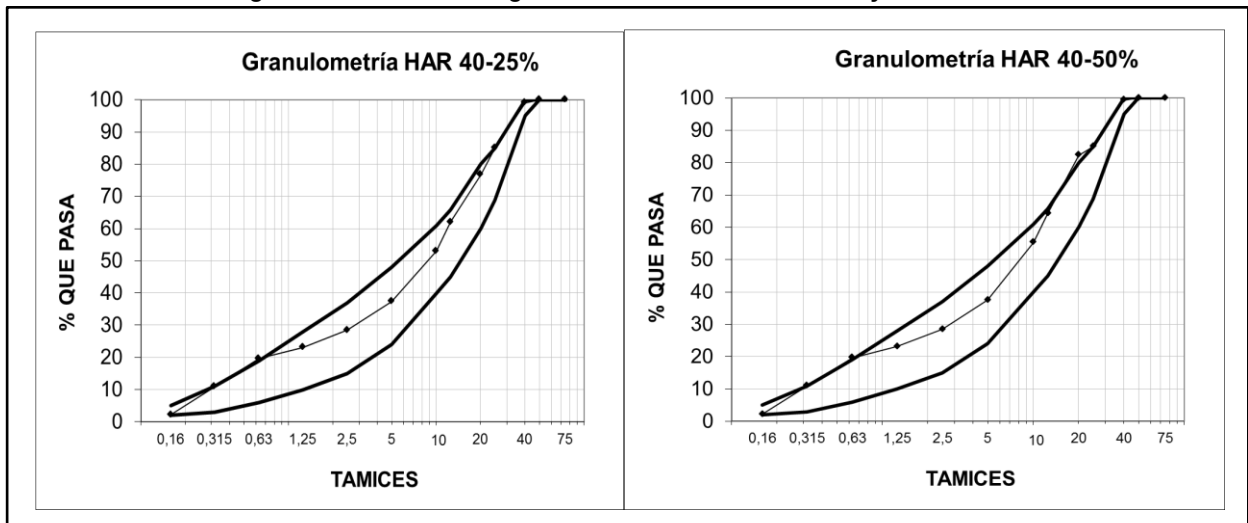
Figura 6.10 Distribución granulométrica del hormigón HC 40 y HAd 40



Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.11 expone la representación gráfica de la granulometría del árido combinado para el hormigón con árido reciclado en un 25% y 50% con tamaño máximo de partícula 40mm.

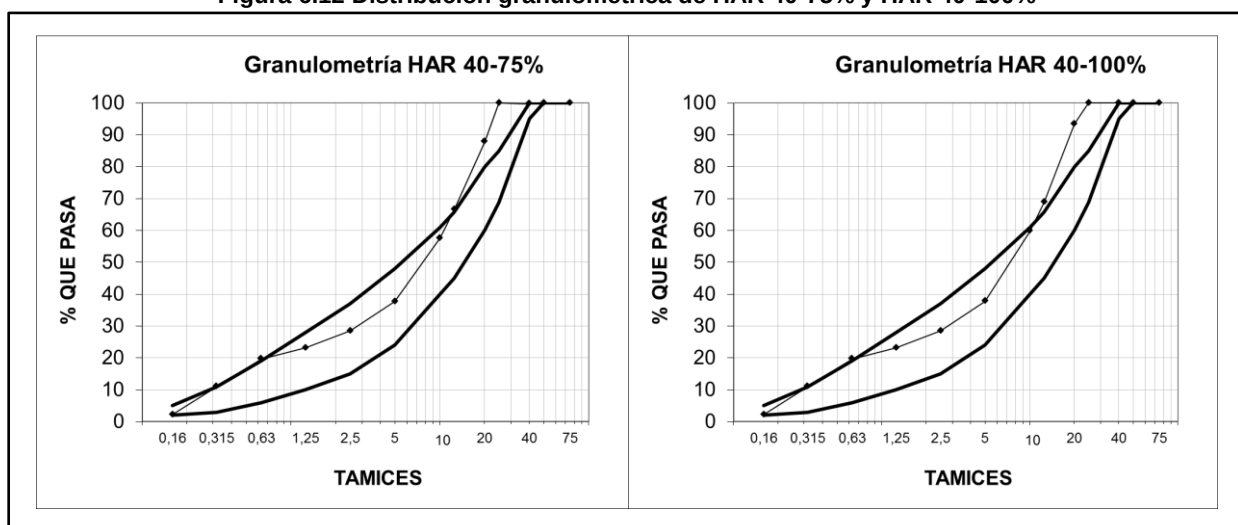
Figura 6.11 Distribución granulométrica de HAR 40-25% y HAR 40-50%



Fuente: Propia, 2015

La Figura 6.12 expone la representación gráfica de la granulometría del árido combinado para el hormigón con árido reciclado en un 75% y 100% con tamaño máximo de partícula 40mm.

Figura 6.12 Distribución granulométrica de HAR 40-75% y HAR 40-100%



Fuente: Propia, 2015

El reemplazo de A.N. por A.R. es en peso, tomando en cuenta las densidades de los áridos utilizados, en la Tabla 6.11 y Tabla 6.10 se exponen las proporciones obtenidas mediante la dosificación según la norma NCh 170.Of85 para la elaboración del hormigón con árido tamaño máximo de partícula 20 mm. y hormigón con árido tamaño máximo de partícula 40 mm. con los distintos tratamientos respectivamente.

Tabla 6.11 Dosificación hormigón tamaño máximo 20 mm.

Mezcla	Combinación de áridos	Proporciones (Kg/m³)					
		Agua	Cemento	Arena	Aditivo	Gravilla 20 mm.	
						A.N.	A.R.
HC-20	Hormigón patrón tamaño máx 20mm.	195	443	683		983	
HAd-20	Hormigón con Aditivo tamaño máx 20mm.	195	443	683	1,11	983	
HAR 25%-20	25% reemplazo A.N. tamaño máx. 20mm.	195	443	667		720	240
HAR 50%-20	50% reemplazo A.N. tamaño máx. 20mm.	195	443	652		469	469
HAR 75%-20	75% reemplazo A.N. tamaño máx. 20mm.	195	443	637		229	687
HAR 100%-20	100% reemplazo A.N. tamaño máx. 20mm.	195	443	621			894

Fuente: Propia, 2015

Tabla 6.12 Dosificación hormigón tamaño máximo 40 mm.

Mezcla	Combinación de áridos	Proporciones (Kg/m ³)				
		Agua	Cemento	Arena	Aditivo	Grava 40 mm.
						A.N. A.R.
HC-40	Hormigón patrón tamaño máx 40mm.	170	395	704		549
HAd-40	Hormigón con Aditivo tamaño máx 40mm.	170	395	704	0,99	549
HAR 25%-40	25% reemplazo A.N. tamaño máx. 40mm.	170	395	686		403 268
HAR 50%-40	50% reemplazo A.N. tamaño máx. 40mm.	170	395	670		262 524
HAR 75%-40	75% reemplazo A.N. tamaño máx. 40mm.	170	395	653		128 766
HAR 100%-40	100% reemplazo A.N. tamaño máx. 40mm.	170	395	636		996

Fuente: Propia, 2015

Tal como lo indica la Tabla 6.9 y la Tabla 6.10, a medida que el nivel de reemplazo aumenta, las cantidades de árido tanto fino como grueso varían, esto debido a la densidad de A.R., por esto las tablas y figuras que a continuación se presentan, muestran la variación en la granulometría del árido combinado.

6.5 Fabricación del Hormigón

La fabricación del hormigón, se realizó, primero separando y pesando los materiales que se utilizaron para la elaboración del hormigón, como lo muestra la Figura 6.13. Simultáneamente se realizó la corrección de humedad a los áridos. La cantidad de materiales se estimó para fabricar 70 litros de hormigón, los cuales eran para generar las probetas necesarias para el estudio más el hormigón a utilizar para medir la docilidad y el contenido de aire en estado fresco.

Figura 6.13 Materiales pesados y separados.



Fuente: Propia, 2015

Posteriormente se prepararon los moldes para las probetas y fueron preparados para generar las probetas utilizadas para el ensayo de compresión, como también para el ensayo de permeabilidad al agua bajo presión, en donde la altura de éstas últimas probetas es menor (Figura 6.14).

Figura 6.14 Moldes para probetas



Fuente: Propia, 2015

Posterior a esto, se comienza a verter los materiales en la betonera vertical (Figura 6.15) con la cual se elaboraron todos los hormigones.

Figura 6.15 Betonera vertical.



Fuente: Propia, 2015

Luego de verter y mezclar todos los materiales, se realizó el ensayo de docilidad y el ensayo de cantidad de aire en estado fresco.

6.6 Ensayos

Los ensayos que se realizaron en esta evaluación se definen a continuación como también la norma por la que se rigen los procedimientos y recolección de datos.

6.6.1 Ensayo de docilidad

La docilidad del hormigón fue medida de acuerdo a la NCh1019 Of2009, luego de esto se compararán todos los hormigones fabricados.

6.6.2 Porcentaje de aire en estado fresco.

El contenido de aire en estado fresco fue medido de acuerdo a la NCh2184 Of92, de esta forma se compararán los distintos hormigones fabricados y la influencia del tamaño máximo del árido, contenido de A.R. y aditivo incorporador de aire.

6.6.3 Penetración de agua bajo presión.

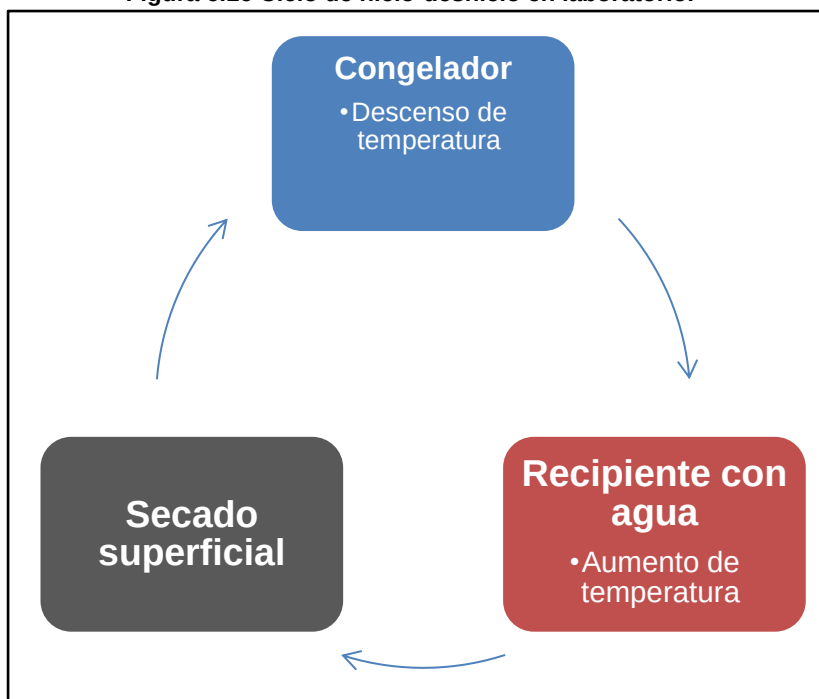
El ensayo de penetración de agua, fue realizado según el procedimiento de la norma NCh2262-2009, éste ensayo se realizará antes y después del ciclo hielo-deshielo.

6.6.4 Ciclos hielo-deshielo.

Estos ciclos, se realizaron a los procedimientos explicados en la norma ASTM C 666/ 666 M y NCh2185 Of92. Se realizarán un total de 50 ciclos y luego las probetas se ensayarán a penetración de agua bajo presión y a compresión.

Para comenzar con la aplicación de ciclos hielo deshielo, el día 28 de curado, se retiraron las probetas y se secaron superficialmente, luego de esto se introdujeron al congelador y se monitoreó la temperatura de congelamiento $-16^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, al llegar a esta temperatura, las probetas se retiraron del congelador y se sumergieron en agua para aumentar su temperatura $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, luego se secaron superficialmente y volvieron a ser introducidas al congelador. La Figura 6.16 resume el proceso para la aplicación de ciclos hielo-deshielo.

Figura 6.16 Ciclo de hielo-deshielo en laboratorio.



Fuente: Propia, 2015

6.6.5 Compresión

El ensayo a compresión, se realizará a los 28 días de curado y luego del ciclo hielo-deshielo, el procedimiento para realizar este ensayo será el que indica la norma NCh 1037-2009.

7. Resultados Obtenidos

7.1 Análisis Descriptivo

Al realizar una inspección visual de los tratamientos realizados, es posible identificar que al retirar las probetas de la piscina de curado aprecia una se diferencia entre las probetas que tienen árido ya sea éste natural o reciclado y en aquellas que fueron elaboradas con aditivo incorporador de aire, tal como se muestra en la Figura 7.1, se aprecian las micro burbujas generadas por el aditivo incorporador de aire.

Figura 7.1 Probeta con aditivo (izq.) y probeta sin aditivo (der.)



Fuente: Propia, 2015

Durante la etapa de exposición a ciclos hielo deshielo, se presentan en algunas probetas del hormigón patrón (HC 20) algunas fisuras, como se muestra en las Figuras 7.2 y 7.3 Estas fisuras aparecieron después del 7° ciclo hielo-deshielo.

Figura 7.2 Fisura producida por ciclo hielo deshielo en HC 20.



Fuente: Propia, 2015

Figura 7.3 Fisura producida por ciclos hielo deshielo en HC 20.



Fuente: Propia, 2015

7.2 Análisis de Estadística Descriptiva

7.2.1 Propiedades del hormigón en estado fresco

La Tabla 7.1 presenta las mediciones obtenidas para cono de asentamiento y contenido de aire en estado fresco.

Como se aprecia en la Tabla 7.1, los hormigones con contenido de A.R, tuvieron mayor asentamiento que los hormigones patrones para los dos tamaños máximos de áridos.

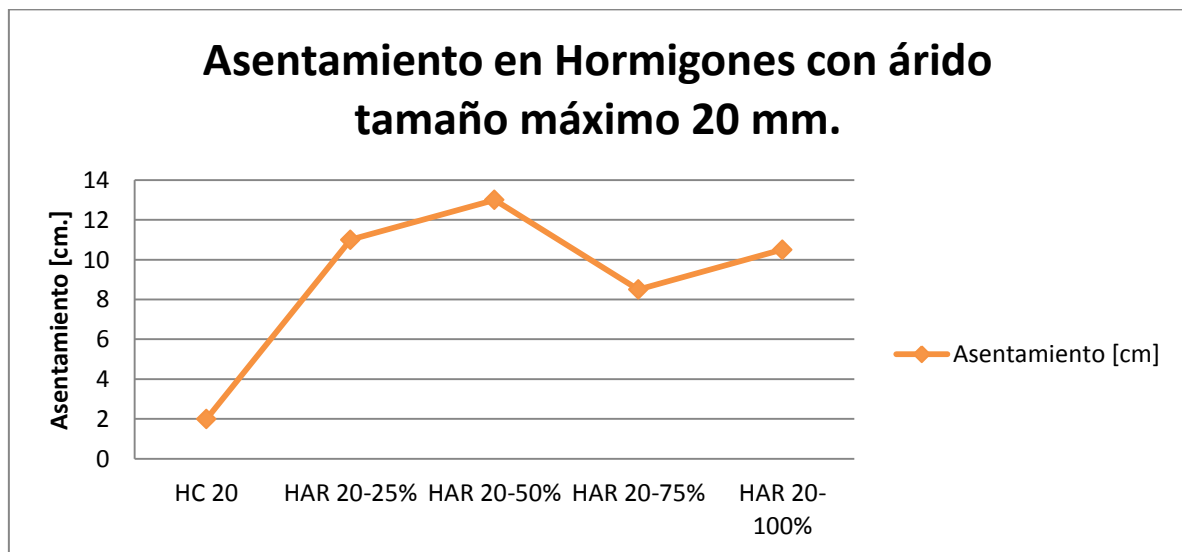
Tabla 7.1 Propiedades del hormigón en estado fresco

Hormigón	Asentamiento [cm]	Aire en estado fresco [%]
HC 20	2	1,6
HAR 20-25%	11	3,1
HAR 20-50%	13	2
HAR 20-75%	8,5	1,5
HAR 20-100%	10,5	1,35
HC 40	3,5	1,3
HAR 40-25%	7	1,7
HAR 40-50%	4	1,3
HAR 40-75%	5	1,5
HAR 40-100%	13,5	1,2

Fuente: Propia, 2015

La Figura 7.4 expone la representación gráfica de los valores de asentamiento para el hormigón control y hormigones con distintos contenidos de A.R. con árido tamaño máximo 20mm. Donde se aprecia que los hormigones con mayor contenido de A.R. obtuvieron en todos los casos un aumento en su docilidad en comparación con el hormigón patrón

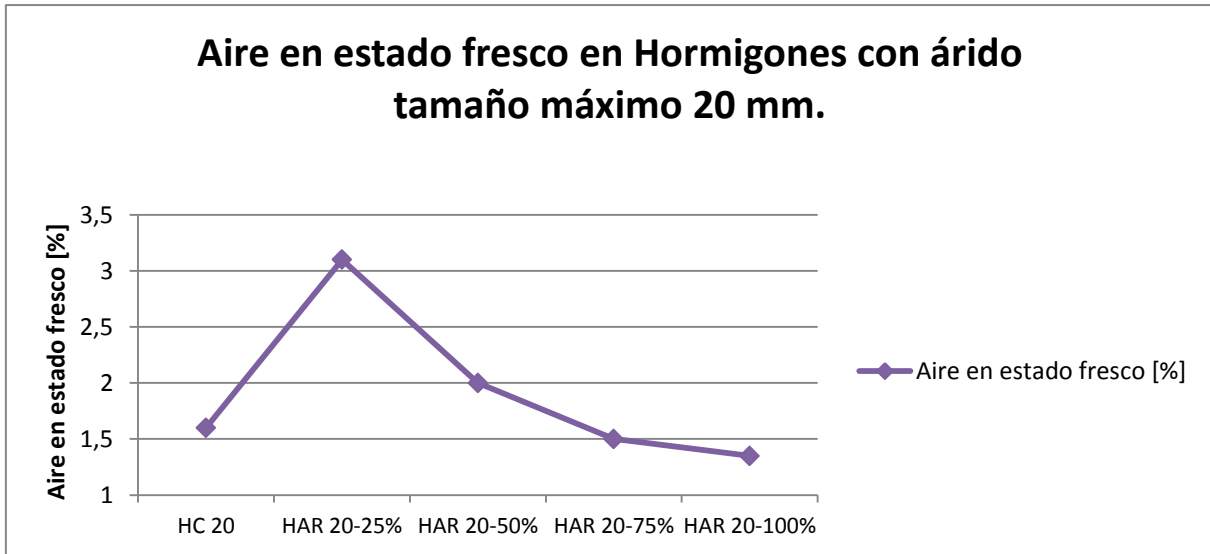
Figura 7.4 Asentamiento de cono Hormigones tam. máx. 20mm.



Fuente: Propia, 2015

La Figura 7.5 expone la representación gráfica de los valores de aire en estado fresco para el hormigón control y hormigones con distintos contenidos de A.R. con árido tamaño máximo 20mm. El contenido de aire en estado fresco, disminuye a medida que aumenta el contenido de árido reciclado. Para el hormigón HAR 20-25% el contenido de aire aumenta un 94% comparado con el hormigón patrón HC 20, en cambio el hormigón HAR 20-100% disminuyó un 16% el contenido de aire en estado fresco comparado con el hormigón patrón HC-20.

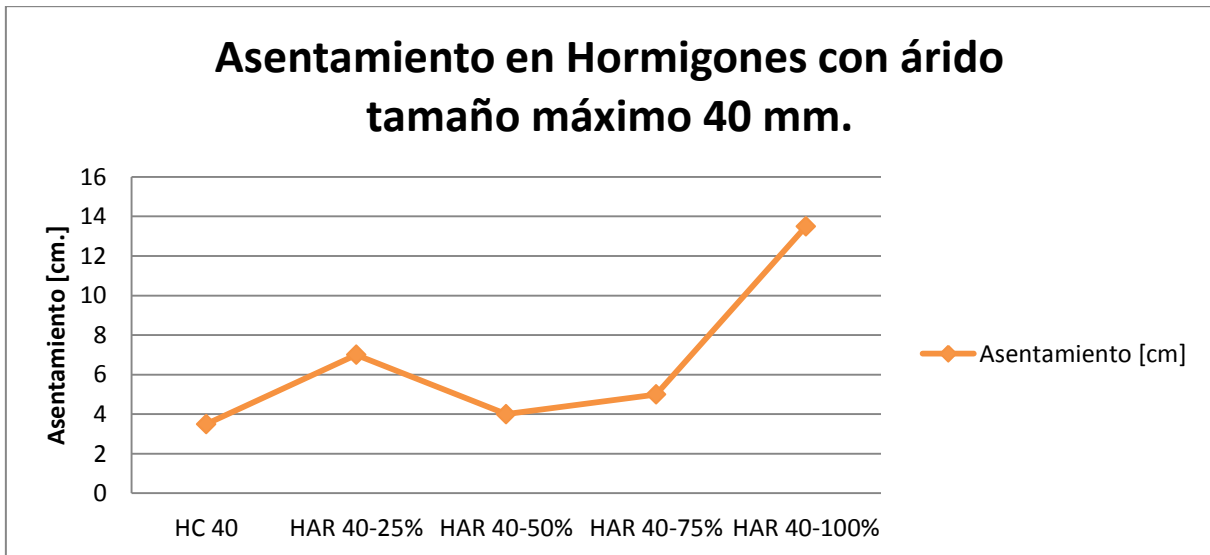
Figura 7.5 Aire en estado fresco para Hormigones tam. máx. 20mm.



Fuente: Propia, 2015

La Figura 7.6 presenta la representación gráfica del asentamiento para los hormigones con los distintos tratamientos con árido tamaño máximo 40mm.

Figura 7.6 Asentamiento de cono Hormigones tam. máx. 40mm.

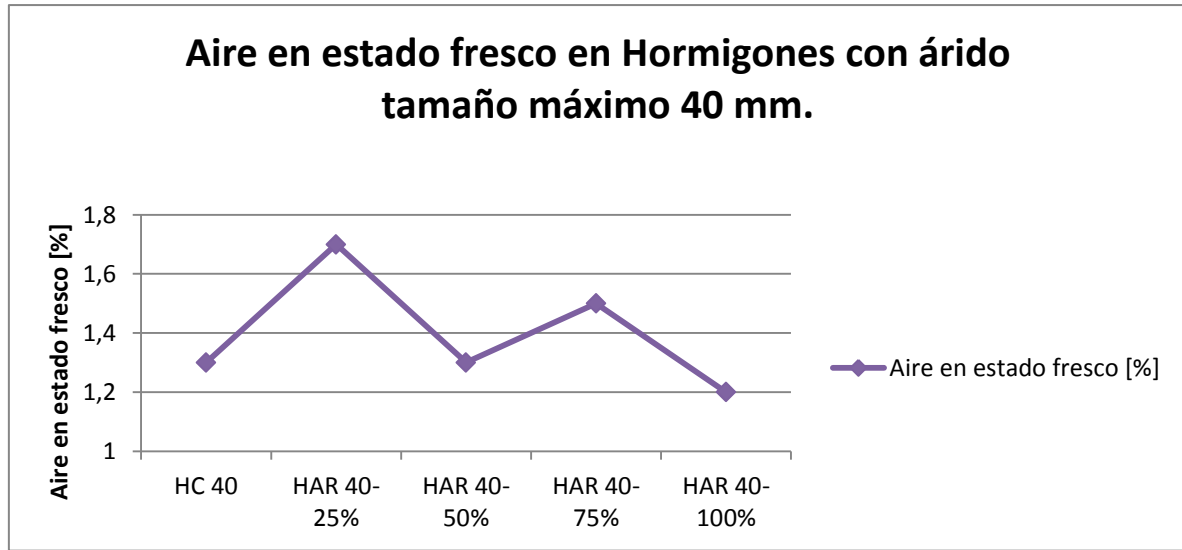


Fuente: Propia, 2015

En la Figura 7.6, se puede apreciar el aumento progresivo de asentamiento en los hormigones con distintos contenidos de A.R, el menor valor para el asentamiento fue para el hormigón patrón HC 40, en cambio el hormigón HAR 40-100% aumentó un 286% el asentamiento.

La Figura 7.7, presenta la representación gráfica del contenido de aire en estado fresco para hormigones con árido tamaño máximo 40 mm, para los distintos tratamientos.

Figura 7.7 Aire en estado fresco para Hormigones tam. máx. 40mm.



Fuente: Propia, 2015

De acuerdo con las mediciones tomadas, el hormigón con mayor cantidad de aire fue el hormigón HAR 40-25% con un 30% más que el hormigón HC 40 y el valor más bajo lo presentó el hormigón HAR 40-100% con un 10% menos que el hormigón patrón HC 40.

De acuerdo con los valores presentados, se establece la relación de que a mayor contenido de A.R. en los hormigones con tamaño de árido máximo 20mm. y 40mm. el contenido de aire en estado fresco disminuye.

La Tabla 7.2, presenta las mediciones obtenidas para el asentamiento y aire en estado fresco para los hormigones patrón HC 20 y HC 40 y los hormigones con aditivo incorporador de aire HAd 20 de HAd 40.

Tabla 7.2 Asentamiento de como Hormigones patrón

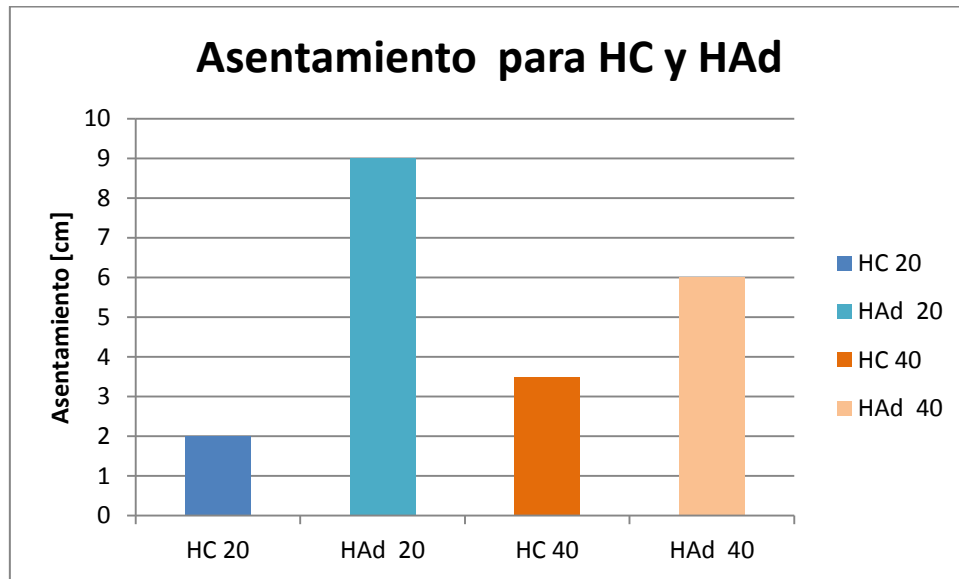
Hormigón	Asentamiento [cm]	Aire en estado fresco [%]
HC 20	2	1,6
HAd 20	9	6,9
HC 40	3,5	1,3
HAd 40	6	5,5

Fuente: Propia, 2015

De la Tabla 7.2, se puede apreciar que para ambos tamaños máximos, el aditivo incorporador de aire aumentó el cono de asentamiento en un 350% para el hormigón HAd 20 y en un 71% para el hormigón HAd 40. También los valores aumentaron para el contenido de aire en estado fresco, un 331% para el hormigón HAd 20 y un 323% para el hormigón HAd 40.

La Figura 7.8, presenta la representación gráfica de los valores medidos para el asentamiento en los hormigones patrón HC 20 y HC 40 y los hormigones con aditivo incorporador de aire HAd 20 de HAd 40.

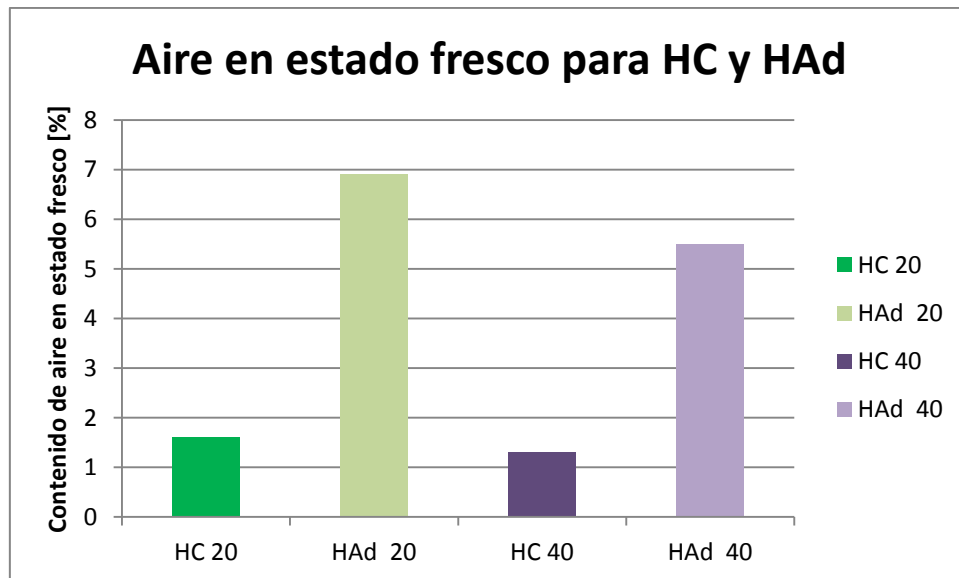
Figura 7.8 Asentamiento para Hormigones patrón.



Fuente: Propia, 2015

La Figura 7.9, presenta la representación gráfica de los valores medidos para el contenido de aire en estado fresco para los hormigones patrón HC 20 y HC 40 y los hormigones con aditivo incorporador de aire HAd 20 de HAd 40.

Figura 7.9 Aire en estado fresco para Hormigones patrón.



Fuente: Propia, 2015

7.2.2 Resistencia a la Compresión

La Tabla 7.3 presenta los resultados promedio de los valores de resistencia a la compresión obtenidos para cada uno de los tratamientos realizados.

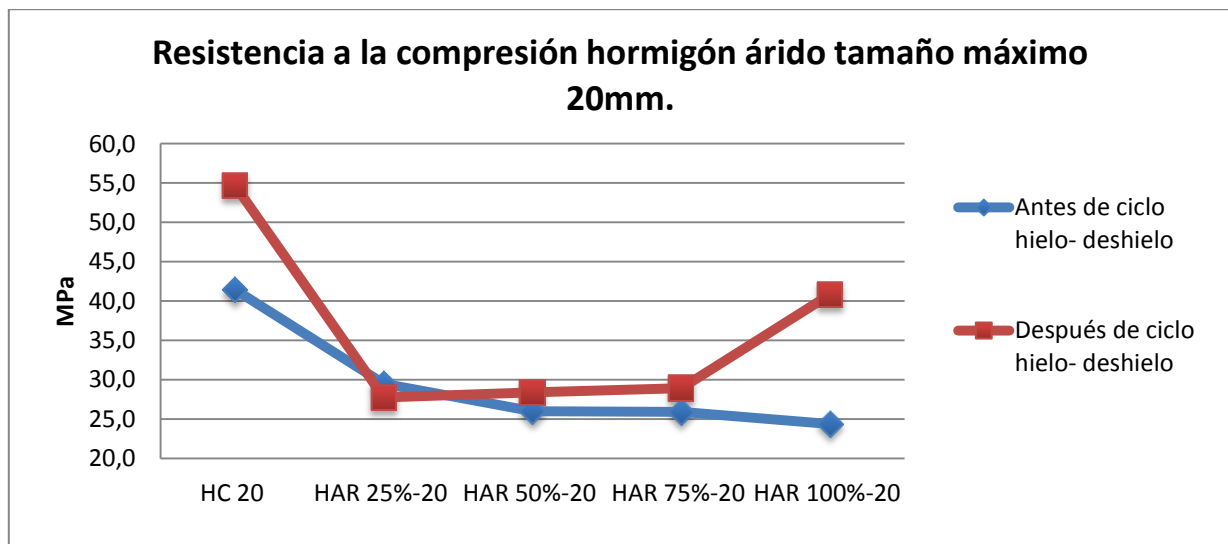
Tabla 7.3 Resistencia a la compresión para hormigones con distintos tratamientos.

Hormigón	Resistencia a la compresión					
	Antes H-D		Después H-D		Comparación resistencia	
	MPa	%	MPa	%	Antes %	Después %
HC 20	41,5	100	54,7	100	100	132
HAR 25%-20	29,5	71	27,7	51	100	94
HAR 50%-20	26,0	63	28,4	52	100	109
HAR 75%-20	25,9	62	28,9	53	100	112
HAR 100%-20	24,4	59	40,8	75	100	167
HC 40	43,0	100	46,4	100	100	108
HAR 25%-40	29,4	68	47,0	101	100	160
HAR 50%-40	29,3	68	39,8	86	100	136
HAR 75%-40	27,4	64	41,8	90	100	153
HAR 100%-40	23,4	54	34,2	74	100	146

Fuente: Propia, 2015

La Figura 7.10 presenta la representación gráfica de los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los hormigones fabricados con árido de tamaño máximo 20mm.

Figura 7.10 Resistencia a compresión en hormigones tam. Max. 20mm.

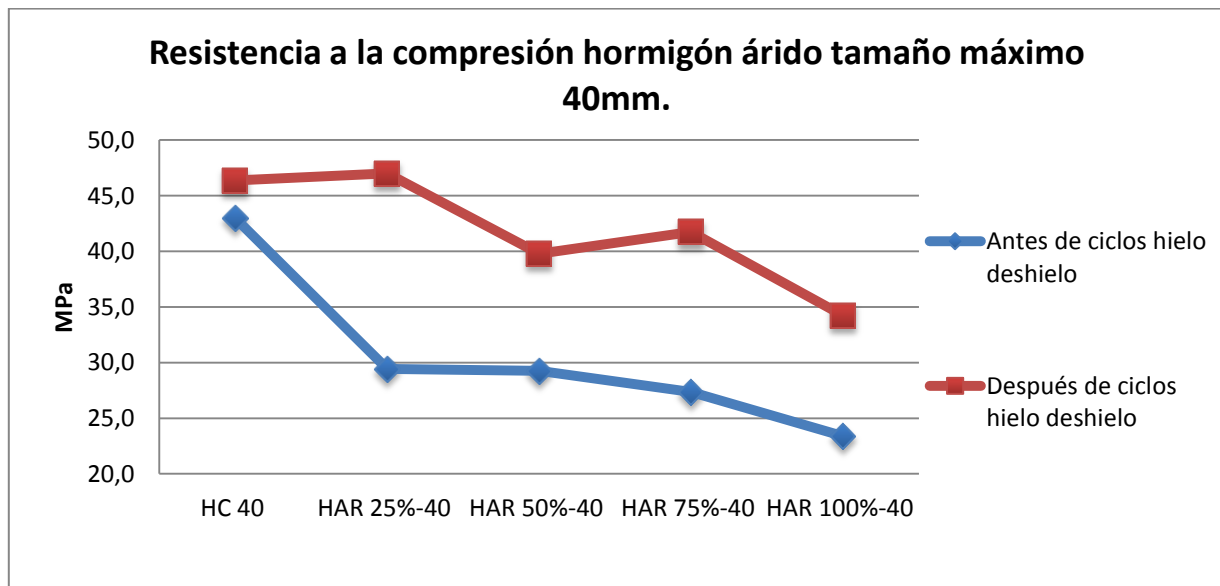


Fuente: Propia, 2015

Como se apreciar en la Tabla 7.3 y la Figura 7.10 la resistencia a la compresión luego de realizados los ciclos hielo-deshielo aumenta un 32% en para el hormigón patrón y en un 5% para el hormigón con árido reciclado, para HAR con tamaño máximo 20mm. y un 49% para HAR con tamaño máximo 40 mm, también se destaca el comportamiento del hormigón con árido reciclado, que a medida que el contenido de A.R. aumenta, también lo hace su resistencia a la compresión después de ser sometido a los ciclos hielo-deshielo.

La resistencia a la compresión en el hormigón con tamaño máximo de árido 40mm., tiene un comportamiento similar al hormigón con árido tamaño máximo de 20mm. tal como se aprecia en la Figura 7.11, el hormigón luego de exponerse a ciclos hielo-deshielo aumenta su resistencia. Por otra parte, a medida que el contenido de árido reciclado aumenta. La resistencia del hormigón disminuye, ocurriendo lo contrario al hormigón con tamaño de árido máximo de 20mm, que tiene una leve tendencia a aumentar su resistencia.

Figura 7.11 Resistencia a la compresión en hormigones tamaño máx. 40 mm.



Fuente: Propia, 2015

La Tabla 7.4 presenta los resultados promedio de los valores obtenidos de resistencia a la compresión, para el hormigón patrón y el hormigón con aditivo incorporador de aire.

Tabla 7.4 Comparación resistencia a la compresión entre HC y HAd

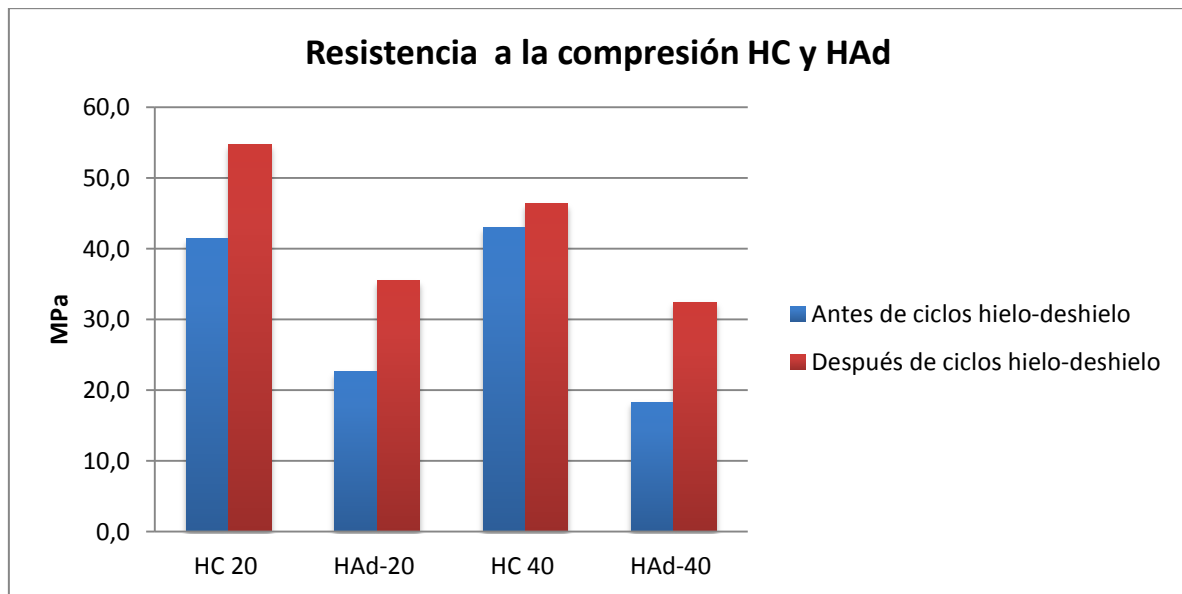
Hormigón	Resistencia a la compresión					
	Antes H-D		Después H-D		Comparación resistencia	
	[MPa]	%	[MPa]	%	Antes %	Después %
HC 20	41,5	100	54,7	100	100	132
HAd-20	22,6	54	35,6	65	100	158
HC 40	43,0	100	46,4	100	100	108
HAd-40	18,3	43	32,5	70	100	178

Fuente: Propia, 2015

La Figura 7.12 presenta la comparación de los resultados obtenidos entre el hormigón patrón y con aditivo incorporador de aire antes y después de los ciclos hielo-deshielo. Tal como ocurrió con los hormigones con A.R. el hormigón con aditivo incorporador de aire aumentó su resistencia a la compresión.

En resumen, el hormigón que obtuvo mayor resistencia a la compresión antes y después de los ciclos hielo-deshielo, fue el hormigón con el árido de mayor tamaño (40mm.).

Figura 7.12 Resistencia a la compresión HC y HAd con tamaño máx. 20 y 40mm.



Fuente: Propia, 2015

7.2.3 Permeabilidad al agua bajo presión

La Tabla 7.5 presenta resultados con los valores promedio de permeabilidad al agua bajo presión obtenidos para los hormigones con los distintos tratamientos realizados.

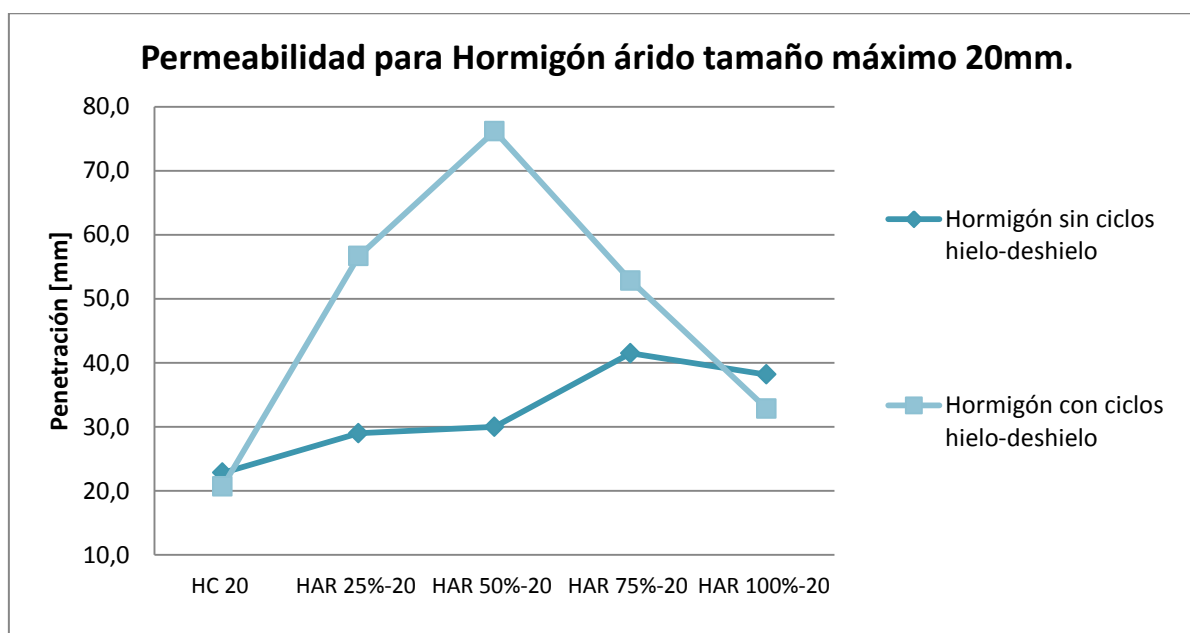
Tabla 7.5 Comparación permeabilidad antes y después de ciclos hielo-deshielo.

Hormigón	Penetración de agua					
	Antes H-D		Después H-D		Comparación Permeabilidad.	
	[mm]	%	[mm]	%	Antes %	Después %
HC 20	23	100	21	100	100	91
HAR 25%-20	29	126	57	271	100	197
HAR 50%-20	30	130	76	362	100	253
HAR 75%-20	42	183	53	252	100	126
HAR 100%-20	38	165	33	157	100	87
HC 40	27	100	15	100	100	57
HAR 25%-40	60	222	61	407	100	102
HAR 50%-40	33	122	35	233	100	106
HAR 75%-40	42	156	53	353	100	126
HAR 100%-40	47	174	58	387	100	123

Fuente: Propia, 2015

En la Figura 7.13 se muestra la representación gráfica de los valores de permeabilidad al agua obtenidos para los hormigones fabricados con árido de tamaño máximo 20 mm.

Figura 7.13 Permeabilidad hormigón con tamaño máximo 20mm.

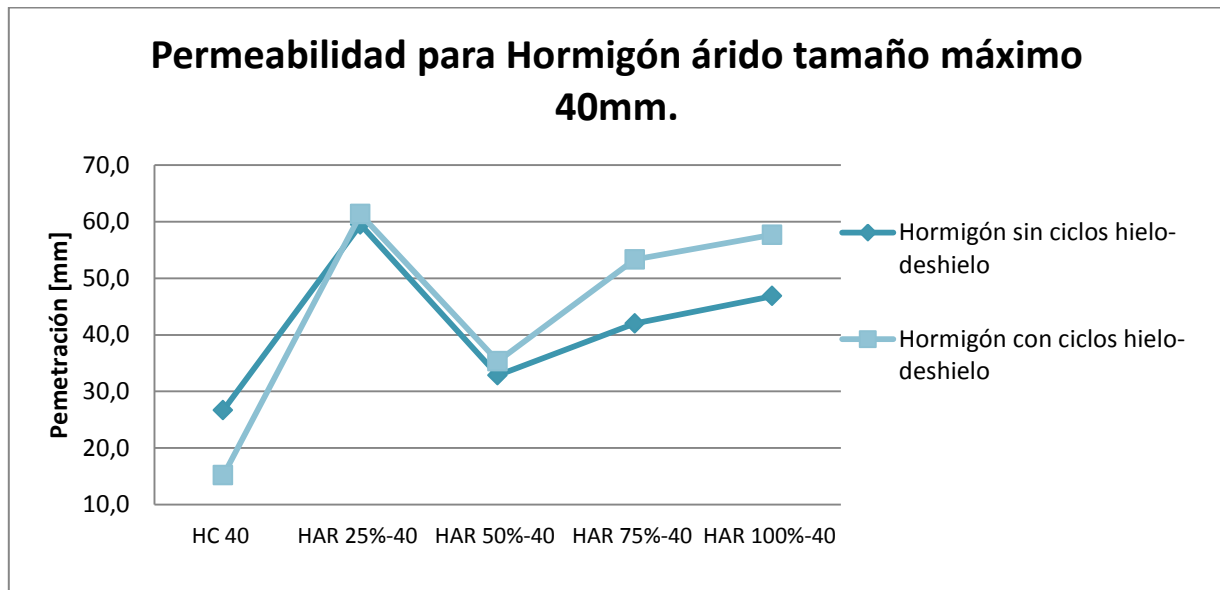


Fuente: Propia, 2015

Según los datos recolectados expuestos en la Tabla 7.6, la permeabilidad al agua en los hormigones antes de los ciclos hielo-deshielo muestra un aumento de penetración de agua a medida que el reemplazo de árido reciclado va creciendo. Luego de realizados los ciclos, el hormigón con 50% de A.R. alcanza casi los 80mm. de penetración que representa un aumento de 154% de la permeabilidad como se muestra en la Tabla 7.6, para los hormigones con mayor cantidad de A.R. la penetración comienza a disminuir. En éste caso la mayor penetración de agua no afecta la resistencia.

La Figura 7.14 muestra la representación gráfica de la penetración de agua bajo presión en los hormigones fabricados con árido de tamaño máximo 40 mm.

Figura 7.14 Permeabilidad hormigón con tamaño máximo 40mm.



Fuente: Propia, 2015

Para el caso del hormigón con un tamaño de árido mayor, la permeabilidad se mantiene estable, si bien en el hormigón patrón luego de los ciclos hielo-deshielo la penetración baja, en el rango de 25% y 50% de árido reciclado la penetración es similar a los hormigones antes de ser expuestos a ciclos hielo-deshielo. El caso contrario ocurre para el rango de 75% a 100% con A.R. donde la penetración aumenta luego de exponer al hormigón a ciclos hielo-deshielo.

La Tabla 7.6 presenta los resultados promedio de los valores de permeabilidad al agua obtenidos para el hormigón patrón y el hormigón con aditivo incorporador de aire.

Tabla 7.6 Comparación penetración de agua en hormigones patrón.

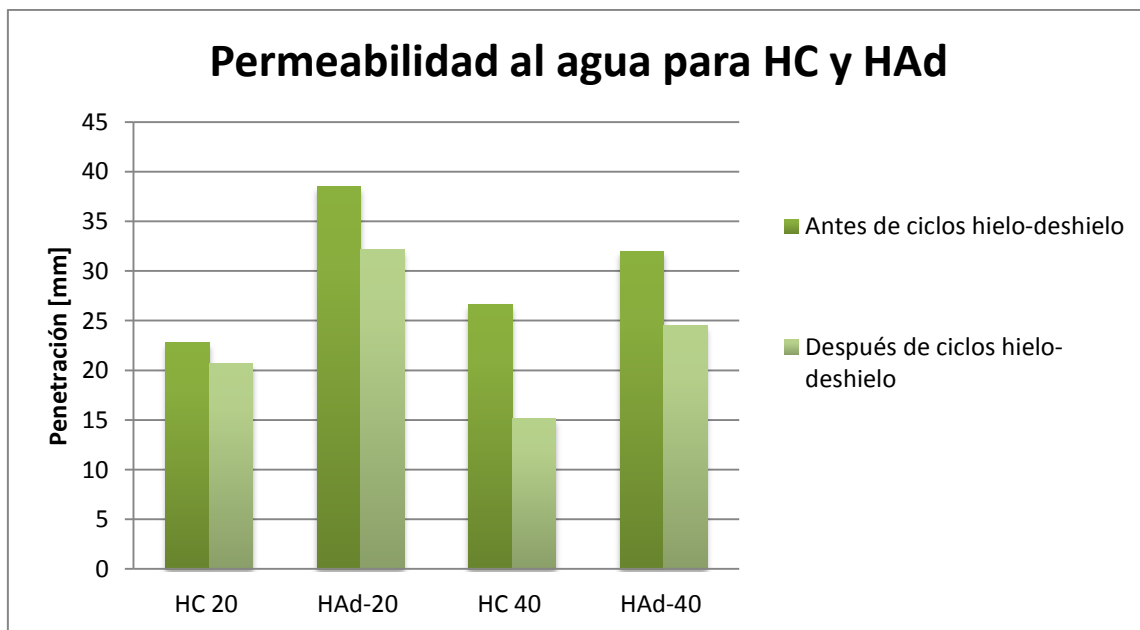
Hormigón	Penetración de agua en mm					
	Antes H-D		Después H-D		Comparación Permeabilidad	
	[mm]	%	[mm]	%	Antes %	Después %
HC 20	23	100	21	100	100	91
HAd-20	39	170	32	152	100	82
HC 40	27	117	15	71	100	56
HAd-40	32	139	25	119	100	78

Fuente: Propia, 2015

Tanto para el hormigón patrón con tamaño máximo de partícula de 20mm. como para el de 40mm. la permeabilidad es mayor antes de ser expuestos a ciclos hielo-deshielo. También, según los datos recolectados el hormigón con aditivo presenta una mayor permeabilidad antes que después de los ciclos hielo-deshielo si se compara con el hormigón patrón.

La Figura 7.15 muestra la representación gráfica de los valores promedios de permeabilidad al agua en el hormigón patrón y en el hormigón con aditivo incorporador de aire.

Figura 7.15 Penetración de agua en hormigones patrón.



Fuente: Propia, 2015

7.3 Análisis estadístico de los resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación fueron analizados con el software Design-Expert versión 7.0.0.

La Tabla 7.7, presenta un resumen de las mediciones recolectadas al momento de ensayar las probetas con los distintos tratamientos.

Tabla 7.7 Mediciones recolectadas

Cantidad A.R.	Tamaño máx.	Comp AHD	Comp DHD	Perm AHD	Perm DHD	Dif. Perm	Dif Comp
[%]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]
0	20	42,9	56,6	31,5	23,5	8	-13,6
0	20	44,1	59,0	16,5	19,5	-3	-13,3
0	20	43,9	57,2	20,5	19	1,5	-14,9
25	20	31,2	28,7	34,5	58	-23,5	1,9
25	20	31,1	29,9	22,5	68,5	-46	2,5
25	20	30,9	29,0	30	43,5	-13,5	1,2
50	20	28,0	29,0	21,5	76,5	-55	-2,7
50	20	27,1	29,7	34	72	-38	-1,0
50	20	27,0	30,9	34,5	80	-45,5	-3,9
75	20	26,5	31,4	39	51,5	-12,5	-4,9
75	20	27,6	30,5	45,5	57,5	-12	-2,9
75	20	27,7	29,4	40	49,5	-9,5	-1,7
100	20	25,5	43,1	29,5	34,5	-5	-17,6
100	20	26,4	42,7	37,5	29,5	8	-18,2
100	20	25,0	43,2	47,5	34,5	13	-16,3
0	40	43,0	56,2	32,5	15,5	17	-13,1
0	40	49,3	50,8	25	14	11	-1,6
0	40	43,4	47,8	22,5	16	6,5	-4,4
25	40	30,4	49,3	74,5	79	-4,5	-15,6
25	40	30,3	51,3	35	34	1	-18,9
25	40	32,3	47,9	69	71	-2	-21,0
50	40	31,5	41,2	30	33	-3	-11,4
50	40	30,0	42,2	30	34,5	-4,5	-9,6
50	40	30,9	42,3	38,5	38,5	0	-12,2
75	40	28,4	43,2	44	42	2	-13,9
75	40	29,0	42,9	45,5	45	0,5	-16,7
75	40	29,1	45,8	36,5	73	-36,5	-14,8
100	40	25,4	36,8	46	89,5	-43,5	-11,4
100	40	24,7	36,5	53,5	45,5	8	-11,8
100	40	23,8	34,9	41	38	3	-11,1

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

En Donde:

Comp AHD: Es el valor de resistencia a la compresión obtenido antes del ciclo hielo-deshielo medido en MPa.

Comp DHD: Es el valor de resistencia a la compresión obtenido después del ciclo hielo-deshielo medido en MPa.

Perm AHD: Es el valor de la penetración de agua antes del ciclo hielo-deshielo medido en milímetros.

Perm DHD: Es el valor de la penetración de agua después del ciclo hielo-deshielo medido en milímetros.

Dif Perm: Es la diferencia entre la medición realizada en milímetros antes del ciclo hielo-deshielo y después del ciclo hielo-deshielo.

Dif Comp: Es la diferencia entre la medición realizada en Mpa antes del ciclo hielo-deshielo y después del ciclo hielo-deshielo.

7.3.1 Resistencia a la Compresión

Mediante el análisis de varianza (ANOVA), para los valores de resistencia a la compresión antes de aplicar ciclos hielo-deshielo (Comp AHD) el estadístico F de 92,86 implica que el modelo es significativo y posee un 0,01% de probabilidad ($p > 0,05$) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad $> F$ menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En este caso estos factores son la cantidad de A.R. (A) y el tamaño máximo (B) (Tabla 7.8).

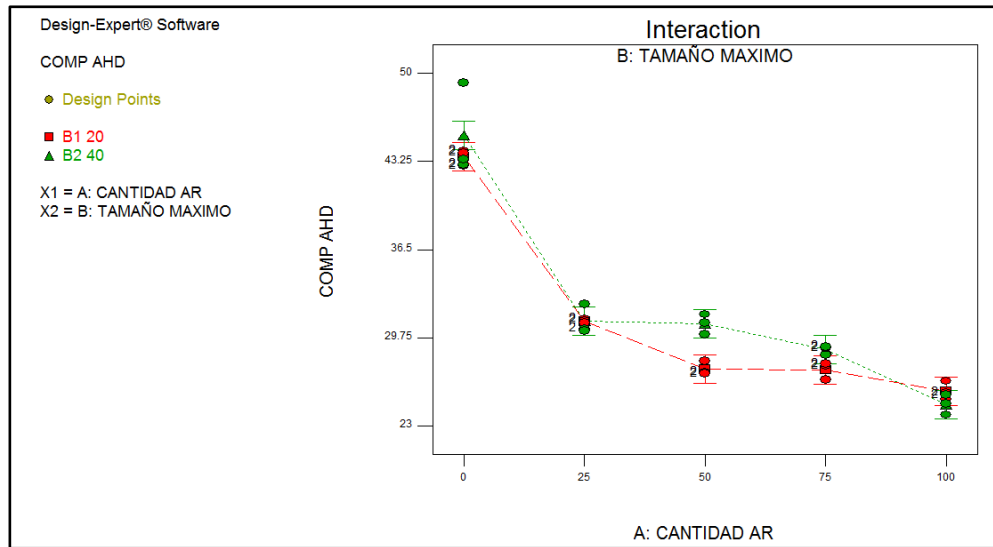
Tabla 7.8 Análisis de varianza (ANOVA) Compresión AHD.

	Response	1	COMP AHD			
ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1383,82	9	153,76	92,86	< 0.0001	significant
A-CANTIDAD AR	1356,66	4	339,16	204,83	< 0.0001	
B-TAMAÑO MAXIMO	9,39	1	9,39	5,67	0.0273	
AB	17,77	4	4,44	2,68	0.0612	
Pure Error	33,12	20	1,66			
Cor Total	1416,94	29				

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

La Figura 7.16 expone la representación gráfica de las variables significativas para el modelo estadístico de compresión AHD, en donde para los dos tamaños máximos de árido, la resistencia a la compresión se ve afectada a medida que la cantidad de A.R. aumenta, antes de aplicar ciclos hielo-deshielo.

Figura 7.16 Gráfico cantidad A.R. vs Tamaño máximo AHD.



Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

Mediante el análisis de varianza (ANOVA), para los valores de resistencia a la compresión después de aplicar ciclos hielo-deshielo (Comp DHD) el estadístico F de 100,83 implica que el modelo es significativo y posee un 0,01% de probabilidad ($p > 0,05$) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad $> F$ menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En este caso estos factores son la cantidad de A.R. (A), el tamaño máximo (B) y la interacción entre ambas variables (AB) (Tabla 7.9).

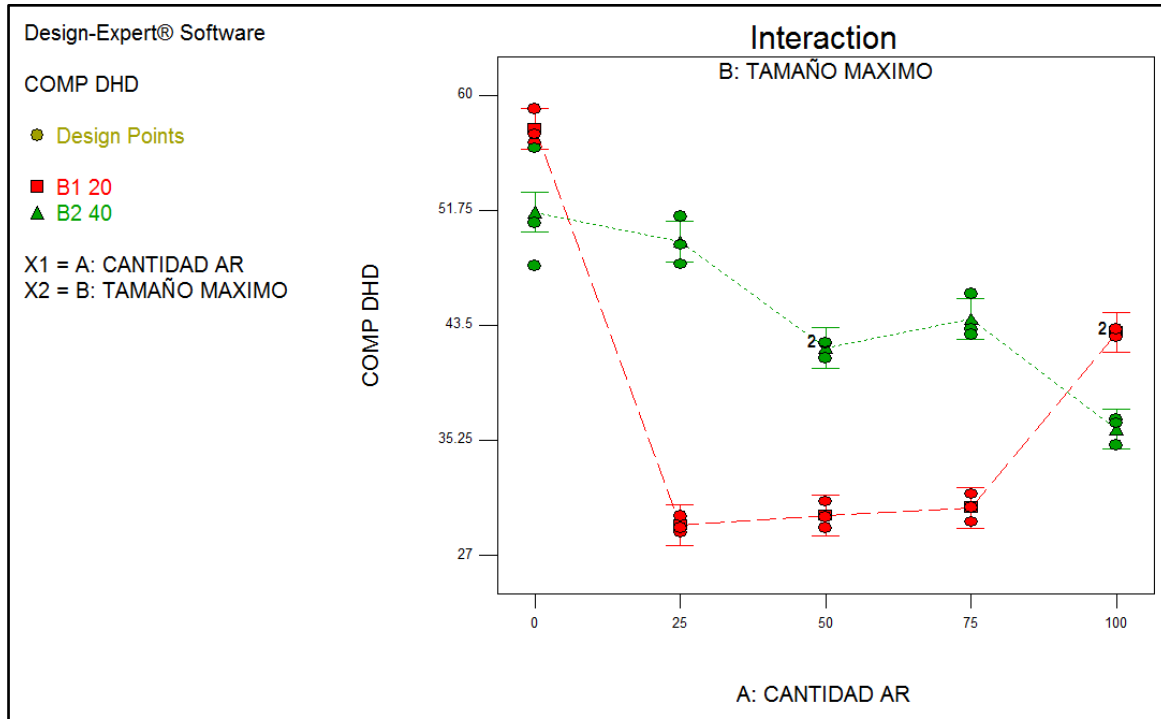
Tabla 7.9 Análisis de varianza (ANOVA) Compresión DHD.

Response	2	COMP DHD				
ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	2615,07	9	290,56	100,83	< 0.0001	significant
A-CANTIDAD AR	1380,19	4	345,05	119,73	< 0.0001	
B-TAMAÑO MAXIMO	325,18	1	325,18	112,84	< 0.0001	
AB	909,70	4	227,42	78,92	< 0.0001	
Pure Error	57,64	20	2,88			
Cor Total	2672,70	29				

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

La Figura 7.17 expone la representación gráfica de las variables significativas para el modelo estadístico de compresión DHD, en donde para los dos tamaños máximos de árido, la resistencia a la compresión se ve afectada a medida que la cantidad de A.R. aumenta, antes de aplicar ciclos hielo-deshielo.

Figura 7.17 Gráfico cantidad A.R. vs Tamaño máximo DHD.



Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

Mediante el análisis de varianza (ANOVA), para la diferencia de resistencias a la compresión antes y después de aplicar ciclos hielo-deshielo (Dif Comp) el estadístico F de 25,91 implica que el modelo es significativo y posee un 0,01% de probabilidad ($p > 0,05$) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad $> F$ menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En este caso estos factores son la cantidad de A.R. (A), el tamaño máximo (B) y la interacción entre ambas variables (AB) (Tabla 7.10).

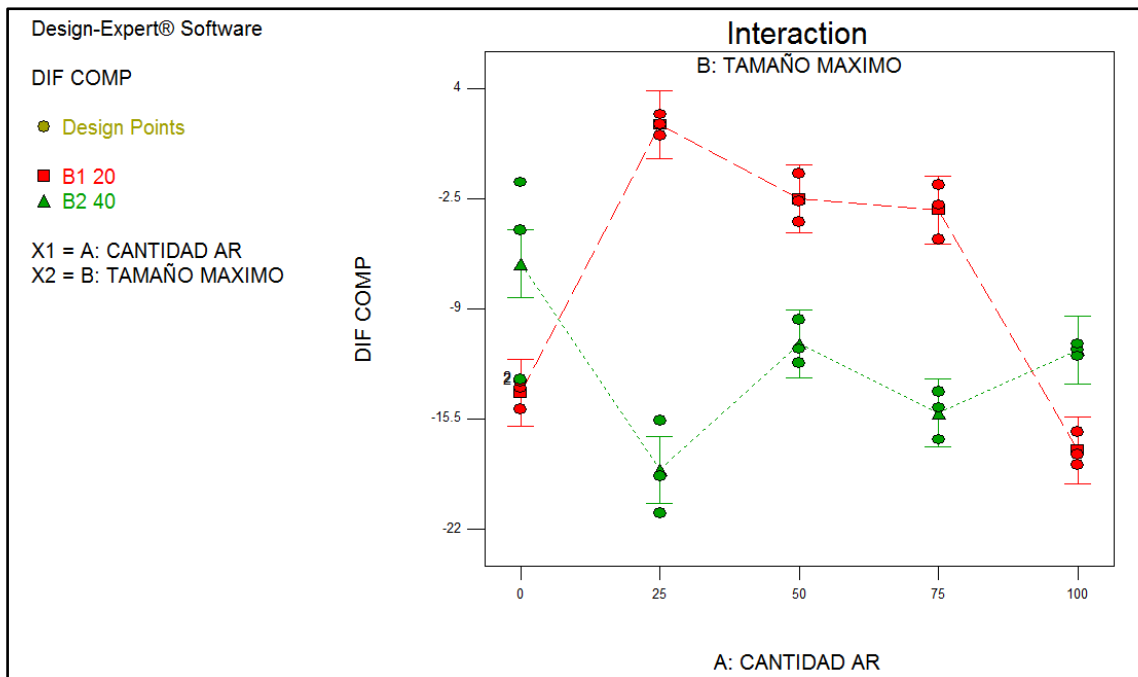
Tabla 7.10 Análisis de varianza (ANOVA) Diferencia Compresión (Dif Comp).

Response	6	DIF COMP				
ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Model	1279,56	9	142,17	25,91	< 0.0001	significant
A-CANTIDAD AR	196,16	4	49,04	8,94	0.0003	
B-TAMAÑO MAXIMO	224,07	1	224,07	40,83	< 0.0001	
AB	859,32	4	214,83	39,15	< 0.0001	
Pure Error	109,76	20	5,49			
Cor Total	1389,32	29				

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

La Figura 7.18 expone la representación gráfica de la interacción entre las variables significativas (AB) para el modelo estadístico de diferencia de compresión antes y después de aplicar ciclos hielo-deshielo, en donde se puede apreciar que para el tamaño máximo de 20mm. a mayor cantidad de A.R. la diferencia entre resistencias a la compresión antes y después de aplicados los ciclos hielo deshielo es menor, por lo tanto, para este tamaño máximo es donde el ciclo hielo-deshielo afecta menos al hormigón.

Figura 7.18 Dif Comp, interacción entre cantidad A.R. y Tamaño Máx.



Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

7.3.2 Permeabilidad al agua

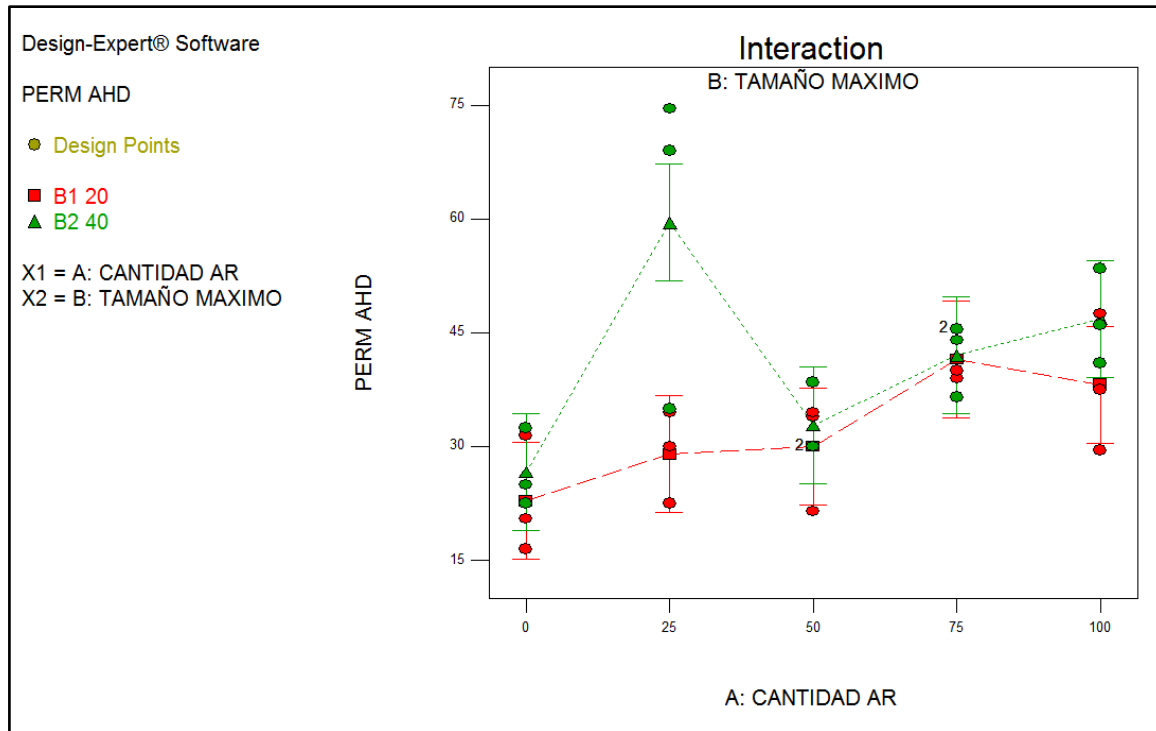
Mediante el análisis de varianza (ANOVA), para los valores de permeabilidad al agua bajo presión antes de aplicar ciclos hielo-deshielo (Perm AHD) el estadístico F de 4,44 implica que el modelo es significativo y posee un 0,27% de probabilidad ($p > 0,05$) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad $> F$ menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En este caso estos factores son la cantidad de A.R. (A) y el tamaño máximo (B) las que influyen en el modelo (Tabla 7.11).

Tabla 7.11 Análisis de varianza (ANOVA) Permeabilidad al agua AHD (Perm AHD).

Response	3	PERM AHD				
ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Model	3262,03	9	362,45	4,44	0.0027	significant
A-CANTIDAD AR	1719,53	4	429,88	5,26	0.0046	
B-TAMAÑO MAXIMO	644,03	1	644,03	7,89	0.0109	
AB	898,47	4	224,62	2,75	0.0568	
Pure Error	1633,33	20	81,67			
Cor Total	4895,37	29				

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

La Figura 7.19 expone la representación gráfica de las variables significativas para el modelo estadístico de permeabilidad al agua antes de aplicar ciclos hielo-deshielo, en donde para los dos tamaños máximos de árido, la permeabilidad aumenta a medida que el contenido de A.R. incrementa.

Figura 7.19 Permeabilidad al agua AHD.

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

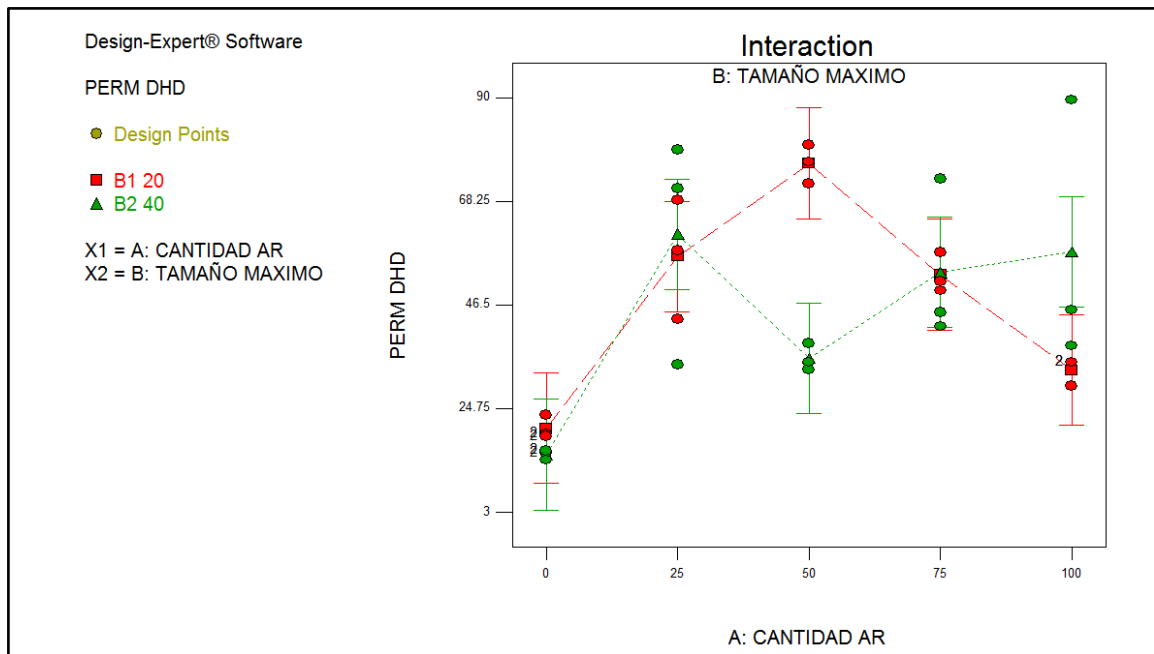
Mediante el análisis de varianza (ANOVA), para los valores de permeabilidad al agua bajo presión después de aplicar ciclos hielo-deshielo (Perm DHD) el estadístico F de 6,06 implica que el modelo es significativo y posee un 0,04% de probabilidad ($p > 0,05$) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad $> F$ menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En este caso estos factores son la cantidad de A.R. (A) y la interacción entre la cantidad de A.R. y tamaño máximo (AB) (Tabla 7.12)

Tabla 7.12 Análisis de varianza (ANOVA) Permeabilidad al agua DHD (Perm DHD).

Response	4	PERM DHD				
ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Model	10124,13	9	1124,90	6,06	0.0004	significant
A-CANTIDAD AR	6619,63	4	1654,91	8,91	0.0003	
B-TAMAÑO MAXIMO	80,03	1	80,03	0,43	0.5190	
AB	3424,47	4	856,12	4,61	0.0084	
Pure Error	3714,67	20	185,73			
Cor Total	13838,80	29				

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

La Figura 7.20 expone la representación gráfica de las variables significativas para el modelo estadístico de permeabilidad al agua después de aplicar ciclos hielo-deshielo, en donde para los dos tamaños máximos de árido, la permeabilidad aumenta a medida que el contenido de A.R. incrementa.

Figura 7.20 Permeabilidad al agua DHD.

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

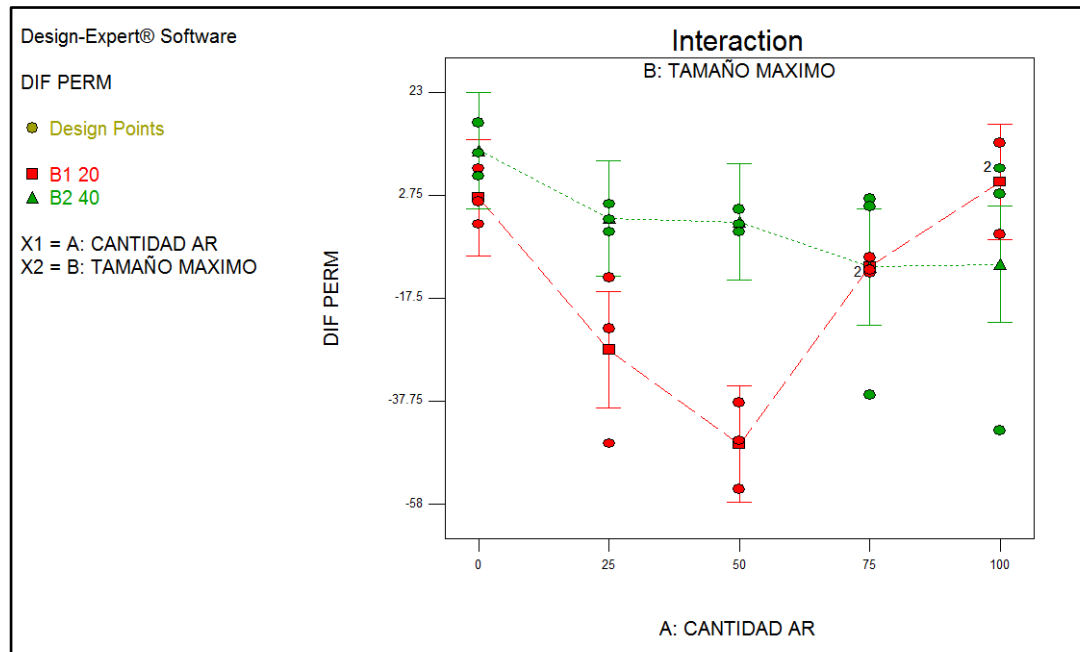
Mediante el análisis de varianza (ANOVA), para la diferencia de permeabilidad antes y después de aplicar ciclos hielo-deshielo (Dif Perm) el estadístico F de 4,81 implica que el modelo es significativo y posee un 0,17% de probabilidad ($p > 0,05$) que un valor F del modelo esté afectado por factores de ruido. Valores de probabilidad $> F$ menores de 0,05, indican las variables significativas del modelo. En este caso estos factores son la cantidad de A.R. (A), el tamaño máximo (B) y la interacción entre ambas variables (AB) (Tabla 7.13).

Tabla 7.13 Análisis de varianza (ANOVA) Diferencia Permeabilidad (Dif Perm).

Response	5	DIF PERM				
ANOVA for selected factorial model						
Analysis of variance table [Classical sum of squares - Type II]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Model	7762,03	9	862,45	4,81	0.0017	significant
A-CANTIDAD AR	3378,12	4	844,53	4,71	0.0076	
B-TAMAÑO MAXIMO	1178,13	1	1178,13	6,57	0.0185	
AB	3205,78	4	801,45	4,47	0.0096	
Pure Error	3583,83	20	179,19			
Cor Total	11345,87	29				

Fuente: Software Desing-Expert versión 7.0.0, 2015

La Figura 7.21 expone la representación gráfica de la interacción de entre ambas variables (AB), en donde se aprecia que la diferencia entre permeabilidades antes y después de aplicar ciclos hielo deshielo, para el hormigón con tamaño máximo de 20mm. disminuye hasta solamente el 50% de reemplazo con A.R. En cambio para el hormigón con árido tamaño máximo 40mm. a medida que aumenta y alcanza una menor diferencia cuando se hace un reemplazo de A.R. en un 100%.

Figura 7.21 Dif Perm, interacción entre cantidad A.R. y Tamaño Máx (AB).

8. Discusión Bibliográfica de Resultados

Según Solas y Giani, 2010, el desarrollo de las propiedades mecánicas del hormigón en el tiempo se pueden describir de la siguiente manera. En el hormigón fresco, inicialmente el agua de amasado rodea y humecta el cemento penetrando paulatinamente desde el exterior hacia el interior de los granos, lo que da inicio a las reacciones químicas de hidratación de los silicatos y aluminatos que contiene, formando un gel de tobermorita coloidal que absorbe cal hasta saturarse, a medida que la hidratación progresa y en cuyo seno precipitan compuestos hidratados en forma de cristales fusiformes, los que se multiplican y entrelazan unos a otros, creando una especie de fieltro que rodea y enlaza los agregados inertes, creando la estructura del hormigón endurecido. Desde un punto de vista puede considerarse que el fenómeno de endurecimiento es un proceso relativamente indefinido en el tiempo, ya que se desarrolla en forma cada vez más lenta, hasta que todo el cemento se haya hidratado y/o exista agua disponible para que esto ocurra.

Por otro lado, Solas y Giani (2010) y Tam et al. (2005) presentan unas experiencias de laboratorio con áridos naturales y áridos reciclados respectivamente, donde exponen que la resistencia de un hormigón en condiciones de curado en laboratorio, a los 90 días puede aumentar hasta un 15% más de la resistencia registrada a los 28 días.

En un principio, la estructura que se va formando a medida que el cemento se va hidratando, contiene una gran cantidad de poros y capilares formados por el agua no combinada, química o físicamente, sin embargo, a medida que la hidratación progresa, éstos poros van llenándose con el gel coloidal formado por los productos sólidos de hidratación, lo que trae como consecuencia una reducción progresiva del volumen de dichos poros y por consiguiente un incremento de la de la compacidad de la pasta, lo que se traduce en un desarrollo progresivo de sus resistencias mecánicas en el tiempo (Solas y Giani, 2010).

También, Mehta y Monteiro (2006), definen a los poros capilares como el espacio no relleno por componentes sólidos de la pasta hidratada del hormigón. Los espacios que durante este proceso no se hidratan serán los que formen los poros capilares, la distancia inicial existente entre las partículas de cemento no hidratadas y la relación agua cemento son los factores que determinarán el tamaño y el volumen de estos poros.

Por lo tanto, cuando la porosidad es elevada, se genera una red interconectada dentro del hormigón permitiendo la circulación libre de agua. Cuando la pasta de cemento es menos porosa parte de los poros capilares se encuentran bloqueados por productos de la hidratación. El agua fluye a través de los poros de gel y de los capilares para penetrar en el interior.

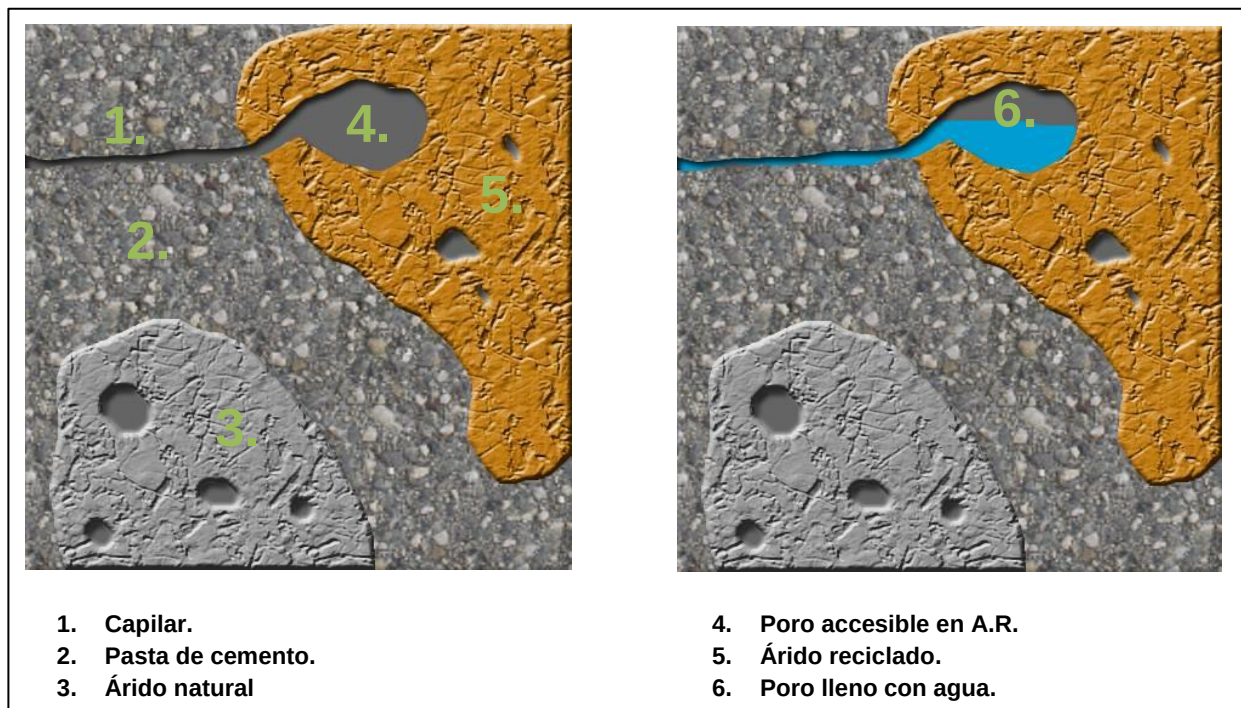
Por otra parte, con respecto a los estudios donde se ha sometido al hormigón a ciclos hielo-deshielo, se concluye que la resistencia y durabilidad va disminuyendo a medida que aumenta la cantidad de ciclos que sufre el hormigón, no obstante como lo expone Cho (2007), Richardson et al. (2011), (Gokce et al., 2004), Shang et al. (2009), en sus investigaciones, la resistencia del hormigón puede mantenerse o aumentar ligeramente antes de los 50 ciclos hielo deshielo. Lo anterior coincide con la evidencia empírica obtenida en ésta investigación.

Por lo tanto a los resultados obtenidos durante éste estudio, se pueden deducir posibles explicaciones a lo sucedido.

Con respecto a el aumento de resistencias en las probetas de hormigón presentadas en éste estudio después de ser expuestas a ciclos hielo-deshielo, tanto para hormigones con árido natural y árido reciclado, puede estar relacionado a que el hormigón continuó con su proceso de hidratación sumado también a que el daño producido por la cantidad de ciclos hielo-deshielo realizados, no fue significativo debido a la cantidad de ciclos aplicados.

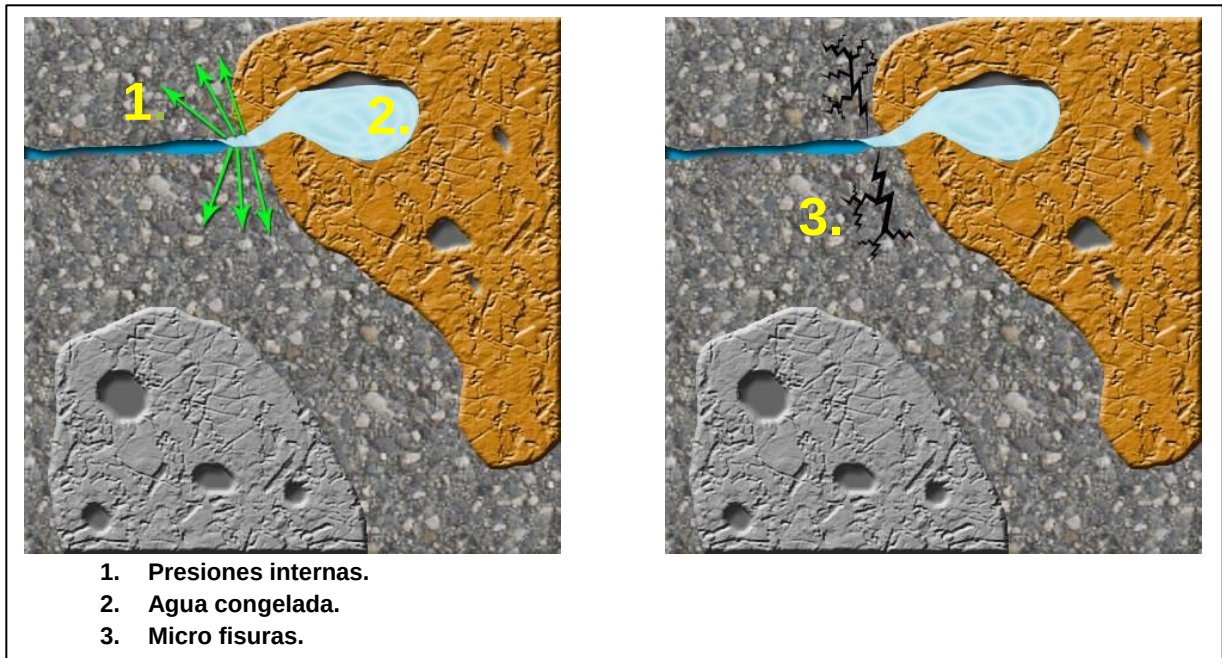
Por otro lado la permeabilidad menor en los hormigones patrón puede deberse a que como se explicó anteriormente. Los capilares y poros tienden a disminuir su tamaño a medida que la pasta de cemento continúa hidratándose y la relación A/C utilizada en la dosificación fue la menor elegida entre la recomendada y la calculada (0,43), quedando poros y capilares pequeños que dificultaban que el agua penetrase con facilidad. Sin embargo, en el hormigón con árido reciclado aumentó la resistencia y también la permeabilidad, para éste caso la razón de esto puede ser que si bien, el agua que penetró en el hormigón con árido reciclado, de acuerdo a la explicación de Solas and Giani (2010) en que el agua alcanza el poro del árido reciclado a debido a que el tamaño del poro no deja que se formen cristales y el agua se congele, como esquematiza la Figura 8.1 y se congeló, en el espacio proporcionado por el árido reciclado, pero no toda el agua que se congeló lo hizo en el poro, sino que también, lo hizo en el capilar entre la pasta de cemento por donde se transportaba el agua hacia los poros del árido reciclado como esquematiza la Figura 8.2. Comenzando a generar presiones internas entre el capilar y el poro del árido reciclado, por ende micro fisurando al hormigón.

Figura 8.1 Esquema microestructura de HAR.



Fuente: Propia, 2015

Figura 8.2 Evolución micro fisuras en HAR.



Fuente: Propia, 2015

9. Conclusiones

Las siguientes conclusiones, están hechas en base a los resultados obtenidos en éste estudio:

1. De acuerdo a la bibliografía consultada y a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, la resistencia del hormigón elaborado con distintos contenidos de árido reciclado, puede mantenerse o elevarse antes de los 50 ciclos hielo-deshielo.
2. Luego de realizar los ciclos hielo-deshielo, los resultados de los ensayos para la resistencia a la compresión del hormigón patrón elaborado con árido tamaño máximo 20mm., dieron como resultado un aumento de 32% su resistencia compresión, en comparación con el resultado de la resistencia a la compresión antes de aplicar los ciclos hielo-deshielo. Y para el hormigón con árido reciclado elaborado con árido tamaño máximo 20mm. aumenta un 5% en promedio su resistencia compresión en comparación con el resultado de la resistencia a la compresión antes de aplicar los ciclos hielo-deshielo.
3. Para el hormigón patrón elaborado con árido tamaño máximo 40mm. luego de aplicar ciclos hielo-deshielo, su resistencia a la compresión aumentó un 8% en comparación con la resistencia a la compresión obtenida antes de someter al hormigón a ciclos hielo-deshielo y para el hormigón con contenido de árido reciclado tamaño máximo de 40mm. la resistencia a la compresión aumentó un 49% en promedio en comparación con la resistencia a la compresión obtenida antes de someter al hormigón a ciclos hielo-deshielo.
4. Para los hormigones con árido reciclado tamaño máximo 20mm. 40mm., a medida que el contenido de árido reciclado aumentó en los distintos niveles establecidos en ésta investigación, su resistencia a la compresión aumentó después de ser sometido a los ciclos hielo-deshielo.
5. Para el hormigón control elaborado con árido tamaño máximo 20mm. después de someterlo a ciclos hielo-deshielo, la permeabilidad disminuyó un 9%, comparado con la permeabilidad antes de aplicar ciclos hielo-deshielo y para el hormigón elaborado con árido reciclado tamaño máximo 20mm. después de ser sometido a ciclos hielo-deshielo aumentó un 66% en promedio en comparación con la permeabilidad antes de aplicar ciclos hielo-deshielo.
6. Para el hormigón control elaborado con árido tamaño máximo 40mm. luego de ser sometido a ciclos hielo-deshielo, la permeabilidad disminuyó un 43%, comparado con la permeabilidad antes de aplicar ciclos hielo-deshielo y para el hormigón elaborado con árido reciclado tamaño máximo 40mm. después de ser sometido a ciclos hielo-deshielo aumentó un 14% en promedio en comparación con la permeabilidad antes de aplicar ciclos hielo-deshielo.
7. Para el caso del hormigón patrón elaborado con árido tamaño máximo 20mm. y con aditivo incorporador de aire, luego de estar sometido a ciclos hielo-deshielo, su permeabilidad disminuyó un 18% comparado con el valor obtenido antes de aplicar ciclos hielo-deshielo.
8. Para el hormigón patrón fabricado con árido tamaño máximo de 40mm. y con aditivo incorporador de aire, después de ser sometido a ciclos hielo-deshielo, los valores obtenidos

de permeabilidad indican que disminuyó un 22% en comparación con los valores obtenidos antes de aplicar los ciclos.

9. De acuerdo a los resultados obtenidos, luego de realizar el análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a la compresión. El hormigón con contenido de árido reciclado que mejor comportamiento tiene a la compresión, es el hormigón con árido reciclado tamaño máximo de 20mm.
10. Luego de realizar el análisis de varianza (ANOVA) a los valores obtenidos para permeabilidad al agua bajo presión, antes y después de aplicar ciclos hielo-deshielo. El hormigón elaborado con árido reciclado que muestra una menor permeabilidad al agua, luego de ser sometido a ciclos hielo-deshielo, es el hormigón con árido tamaño máximo de 40mm.

10. Propuesta de Futuras Investigaciones

Las siguientes propuestas de investigación, se realizan en base a la búsqueda de una mejor explicación al comportamiento estudiado:

- Estudiar el comportamiento del hormigón fabricado con árido reciclado luego de los 100 ciclos hielo-deshielo.
- Utilizar aditivo plastificante en la dosificación, para contrarrestar la absorción por parte de A.R. y luego estudiar su comportamiento frente a ciclos hielo deshielo
- Cambiar el tipo de cemento a uno de alta resistencia y someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.
- Dosificar el hormigón con árido reciclado y con aditivo incorporador de aire, para luego someter al hormigón a ciclos hielo-deshielo.

Referencias

- AGUILAR, C., MUÑOZ, M. P. & LOYOLA, O. 2005. Uso de hormigón reciclado para la fabricación de hormigones. *Revista Ingeniería de Construcción*, 20, 35-44.
- AJDUKIEWICZ, A. & KLISZCZEWICZ, A. 2002. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24, 269-279.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS C260 - Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete. 04.02.
- BRITO, J. M., GONÇALVES, A. P. & SANTOS, J. R. D. 2006. Producción de hormigón reciclado. Reciclaje repetitivo de agregados gruesos de hormigón. *Ingeniería de Construcción*, 21, 33 - 40.
- CAKIR, Ö. 2014. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 68, 17-25.
- CÁNOVAS, M. F. 2007. Hormigón. *Colegio de ingenieros Caminos*, 666.
- CASUCCIO, M., TORRIJOS, M. C., GIACCIO, G. & ZERBINO, R. 2008. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 1500–1506.
- CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE (CSI) 2009. Recycling Concrete Full Report. World Business Council for Sustainable Development.
- COMISIÓN DE NACIONAL ÁRIDOS 2001. Sistematización de antecedentes técnicos y ambientales. *Industria del árido en Chile*, 1, 4.
- CHAUVEINC, J. A. 2011. Estudio experimental de propiedades mecánicas de hormigones con árido reciclado mediante la modificación del método de mezclado del hormigón. *Departamento de Ingeniería Civil*. Universidad de Chile.
- CHEN, H.-J., TSONG, Y. & KUAN-HUNG, C. 2003 Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33, 125-133.
- CHO, T. 2007. Prediction of cyclic freeze–thaw damage in concrete structures based on response surface method. *Construction and Building Materials*, 21, 2031-2040.
- DILLMANN, R. 1998. Concrete with recycled concrete aggregate. *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. London, UK.
- ETXEBERRÍA, M., VAZQUEZ, E. & MARI, A. 2007. Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40, 529-541.
- FERNÁNDEZ, L., VITOLA, L. & SALMINCI, P. 2000. Estado del arte en el uso de hormigones porosos. *XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito Buenos Aires, Argentina*, 2, 761.
- GOKCE, A. 2001. *Investigation of the Parameters Controlling Frost Resistance of Recycled Aggregate Concrete*. Doctoral thesis, Niigata University.

- GOKCE, A., NAGATAKI, S., SAEKI, T. & HISADA, M. 2004. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 799-806.
- GÓMEZ, J. M. V. 2002. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32, 1301-1311.
- GONZALEZ-COROMINAS, A. & ETXEBERRIA, M. 2014. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, 618-626.
- HANSEN, T. C. & NARUD, H. 1983. Recycled concrete and silica fume make calcium silicate bricks. *Cement and Concrete Research*, 13, 626-630.
- HOSOKAWA, Y., MAEDA, N. & HAYASAKA, T. 1997. Influence of the time of removing mortar from recycled coarse aggregate on the properties of concrete products using recycled coarse aggregate from waste concrete. *Proceedings of CSCE/JSCE International Conference on Engineering Materials*. Ottawa, Canada.
- ISMAIL, S. & MAHYUDDIN, R. 2014. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, 726-739.
- KATZ, A. 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 703-711.
- KAWAMURA, M. & TORII, K. 1988. Reuse of recycled concrete aggregate for pavement. *Proceedings of the Second International Symposium (RILEM) on Demolition and Reuse of Concrete and Masonary*. Tokyo, Japan.
- KOU, S. C. & POON, C. S. 2012. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69-76.
- KOU, S. C., POON, C. S. & ETXEBERRIA, M. 2014. Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites*, 53, 73-82.
- LOMBOY, G. & WANG, K. 2009. Effects of Strength, Permeability, and Air Void Parameters on Freezing-Thawing Resistance of Concrete with and Without Air Entrainment. *Journal of ASTM International*, 6, 14.
- MARTÍNEZ-SOTO, I. E. & MENDOZA-ESCOBEDO, C. J. 2006. Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 7, 151-164.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. 2006. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*
- MENÉNDEZ, E. 2005. Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia de los materiales de construcción a los ciclos hielo-deshielo. *Cemento Hormigón*.
- MEYER, C. 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31, 601-605.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE 2011. Informe del Estado del Medio Ambiente 2011

- MINVU 2014. Estrategia nacional de construcción sustentable.
- MONTOYA, H. D., PINO, C. L. & VALDÉS, G. A. 2005. Reutilización de residuos del hormigón. *BIT*, 12, 44-47.
- NISHIBAYASHI, S. & YAMURA, K. 1988. Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by crushing concrete. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, 2, 652-659.
- PADMINI, A. K., RAMAMURTHY, K. & MATHEWS, M. S. 2009. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 829–836.
- PAVÓN, E., ETXEBERRIA, M. & MARTÍNEZ, I. 2011. Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte. *Revista de la Construcción*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- PIGEON, M. & PLEAU, R. 1995. Durability of concrete in cold climates. *Modern Concrete Technology Series*.
- POON, C. S., KOU, S. C. & LAM, L. 2002. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, 16, 281-289.
- POON, C. S., SHUI, Z. H. & LAM, L. 2004. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18, 461-468.
- POON, C. S., YU, A. & NG, L. H. 2001. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 32, 157–172.
- RAHAL, K. 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42, 407–415.
- RAKSHVIR, M. & BARAI, S. V. 2006. Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research*, 24, 225-233.
- RICHARDSON, A., COVENTRY, K. & BACON, J. 2011. Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 19, 272-277.
- SÁNCHEZ, M. & ALAEJOS GUTIÉRREZ, P. 2006. Influencia del árido reciclado en las propiedades del hormigón estructural. *Cemento y Hormigón* 889, 54-61.
- SHANG, H., SONG, Y. & OU, J. 2009. Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22, 261-266.
- SOLAS, A. & GIANI, R. 2010. *Tecnología del hormigón avanzada*.
SPIEGEL & MEADOWS 2002.
- TAM, V. W. Y., GAO, X. F. & TAM, C. M. 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35, 1195-1203.
- TOPÇU, I. B. 1997. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cement and Concrete Research*, 27, 1817-1823.
- TOPÇU, I. B. & GÜNÇAN, N. F. 1995. Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*, 25, 1385-1390.

- TOPÇU, I. B. & ŞENGEL, S. 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34, 1307-1312.
- TU, T.-Y., CHEN, Y.-Y. & HWANG, C.-L. 2006. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36, 943–950.
- U.S. GREEN BUILDING COUNCIL 2010. Imagine.
- YAMATO, T., EMOTO, Y., SOEDA, M. & SAKAMOTO, Y. 1988. Some properties of recycled aggregate concrete. *Proceedings of the Second International Symposium (RILEM) on Demolition and Reuse of Concrete and Masonary*. Tokyo, Japan.
- ZAHARIEVA, R., BUYLE-BODIN, F. & WIRQUIN, E. 2004. Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 1927-1932.
- Forster, S. W., S. P. Moore, et al. (1994). Behavior of recycled concrete as aggregate in concrete. Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Nice, France.: 17-31.
- Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

11. Anexos

Anexo A Tablas de datos recopilados

El presente anexo, recopila todos los datos medidos en las probetas para los distintos tipos de ensayos realizados en ésta investigación.

La Tabla 11.1, presenta las mediciones de las dimensiones tomadas a las probetas de hormigón árido tamaño 20mm, utilizadas para el ensayo a compresión, antes de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.1 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 20mm antes H-D.

Nombre H°		a (mm)	b (mm)	h (mm)	Area cara A.F (mm ²)
HC-20					
	Probeta 1	150,50	151,00	150,00	22.725,50
	Probeta 2	150,50	150,00	150,00	22.575,00
	Probeta 3	150,50	150,00	150,00	22.575,00
HAd-20					
	Probeta 1	152,00	151,50	151,00	23.028,00
	Probeta 2	151,50	151,00	151,25	22.876,50
	Probeta 3	151,00	151,00	151,00	22.801,00
HAR 25%-20					
	Probeta 1	150,00	151,00	150,75	22.650,00
	Probeta 2	150,50	150,50	150,75	22.650,25
	Probeta 3	150,50	150,00	151,00	22.575,00
HAR 50%-20					
	Probeta 1	150,50	150,00	150,00	22.575,00
	Probeta 2	150,00	151,00	149,75	22.650,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 75%-20					
	Probeta 1	150,00	149,50	150,25	22.425,00
	Probeta 2	149,50	150,00	150,00	22.425,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,25	22.500,00
HAR 100%-20					
	Probeta 1	151,50	150,50	151,50	22.800,75
	Probeta 2	151,50	151,00	151,50	22.876,50
	Probeta 3	152,00	151,50	151,25	23.028,00

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.2, presenta las mediciones de las dimensiones tomadas a las probetas de hormigón árido tamaño 40mm, utilizadas para el ensayo a compresión, antes de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.2 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 40mm antes H-D.

Nombre H°		a (mm)	b (mm)	h (mm)	Area cara A.F (mm2)
HC-40	Probeta 1	151,50	151,50	151,25	22.952,25
	Probeta 2	150,50	151,50	151,25	22.800,75
	Probeta 3	151,50	150,50	151,25	22.800,75
HAd-40	Probeta 1	150,00	150,50	149,75	22.575,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 25%-40	Probeta 1	150,50	151,50	151,00	22.800,75
	Probeta 2	151,00	151,50	151,50	22.876,50
	Probeta 3	151,00	150,50	151,75	22.725,50
HAR 50%-40	Probeta 1	152,00	150,00	151,25	22.800,00
	Probeta 2	151,50	150,50	151,00	22.800,75
	Probeta 3	151,00	151,50	151,25	22.876,50
HAR 75%-40	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	150,50	150,00	150,00	22.575,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 100%-40	Probeta 1	150,00	149,50	150,00	22.425,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.3, presenta las propiedades físicas calculadas a las probetas de hormigón árido tamaño 20mm, utilizadas para el ensayo a compresión, antes de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.3 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 20mm antes de H-D.

Nombre H°		Volúmen (mm3)	Peso (kg)	Densidad (kg/m3)	Resistencia cubo 150 mm(Mpa)
HC-20	Probeta 1	3.408.825,00	8,11	2.380,23	42,93
	Probeta 2	3.386.250,00	8,16	2.408,83	43,91
	Probeta 3	3.386.250,00	8,12	2.398,46	44,06
HAd-20	Probeta 1	3.477.228,00	7,55	2.171,36	23,82
	Probeta 2	3.460.070,63	7,52	2.172,96	23,89
	Probeta 3	3.442.951,00	7,58	2.200,21	23,70
HAR 25%-20	Probeta 1	3.414.487,50	7,90	2.313,52	30,85
	Probeta 2	3.414.525,19	7,96	2.329,81	31,16
	Probeta 3	3.408.825,00	7,89	2.313,32	31,05
HAR 50%-20	Probeta 1	3.386.250,00	7,83	2.313,39	27,07
	Probeta 2	3.391.837,50	7,86	2.317,95	27,95
	Probeta 3	3.375.000,00	7,81	2.315,53	26,97
HAR 75%-20	Probeta 1	3.369.356,25	7,79	2.311,12	26,50
	Probeta 2	3.363.750,00	7,77	2.309,36	27,57
	Probeta 3	3.380.625,00	7,77	2.298,51	27,72
HAR 100%- 20	Probeta 1	3.454.313,63	7,65	2.215,29	25,51
	Probeta 2	3.465.789,75	7,62	2.199,53	25,02
	Probeta 3	3.482.985,00	7,66	2.200,44	26,41

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.4, presenta las propiedades físicas calculadas a las probetas de hormigón árido tamaño 40mm, utilizadas para el ensayo a compresión, antes de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.4 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 40mm antes H-D.

Nombre H°		Volúmen (mm3)	Peso (kg)	Densidad (kg/m3)	Resistencia cubo 150 mm(Mpa)
HC-40	Probeta 1	3.471.527,81	8,21	2.364,84	43,03
	Probeta 2	3.448.613,44	8,21	2.379,36	49,29
	Probeta 3	3.448.613,44	8,21	2.379,51	43,43
HAd-40	Probeta 1	3.380.606,25	7,61	2.250,42	15,37
	Probeta 2	3.375.000,00	7,55	2.236,68	21,39
	Probeta 3	3.375.000,00	7,60	2.252,47	21,16
HAR 25%-40	Probeta 1	3.442.913,25	8,06	2.340,46	32,32
	Probeta 2	3.465.789,75	8,12	2.342,01	30,42
	Probeta 3	3.448.594,63	8,04	2.331,36	30,26
HAR 50%-40	Probeta 1	3.448.500,00	7,91	2.293,61	30,90
	Probeta 2	3.442.913,25	7,90	2.295,44	31,52
	Probeta 3	3.460.070,63	8,01	2.314,75	29,98
HAR 75%-40	Probeta 1	3.375.000,00	7,79	2.309,36	28,97
	Probeta 2	3.386.250,00	7,86	2.321,06	29,07
	Probeta 3	3.375.000,00	7,77	2.302,73	28,41
HAR 100%-40	Probeta 1	3.363.750,00	7,75	2.302,94	25,36
	Probeta 2	3.375.000,00	7,79	2.309,21	24,69
	Probeta 3	3.375.000,00	7,73	2.291,29	23,83

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.5, presenta las mediciones de las dimensiones tomadas a las probetas de hormigón árido tamaño 20mm, utilizadas para el ensayo a compresión, después de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.5 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 20mm después H-D.

Nombre H°		a (mm)	b (mm)	h (mm)	Area cara A.F (mm2)
HC-20	Probeta 1	150,50	150,00	150,00	22.575,00
	Probeta 2	150,00	150,50	150,25	22.575,00
	Probeta 3	150,50	150,50	150,00	22.650,25
HAd-20	Probeta 1	150,00	149,50	150,00	22.425,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 25%-20	Probeta 1	149,50	150,00	150,00	22.425,00
	Probeta 2	150,00	149,50	150,00	22.425,00
	Probeta 3	150,50	150,00	150,00	22.575,00
HAR 50%-20	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 75%-20	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 100%-20	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,50	150,00	22.575,00

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.6, presenta las propiedades físicas calculadas a las probetas de hormigón árido tamaño 20mm, utilizadas para el ensayo a compresión, después de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.6 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 20mm después H-D.

Nombre H°	Volúmen (mm3)	Peso (kg)	Densidad (kg/m3)	Resistencia cubo 150 mm (Mpa)
HC-20	3.386.250,00	7,99	2.359,84	56,57
	3.391.893,75	8,03	2.368,29	57,18
	3.397.537,50	8,62	2.537,13	58,98
HAd-20	3.363.750,00	7,31	2.174,36	37,62
	3.375.000,00	7,39	2.188,62	37,42
	3.375.000,00	7,66	2.269,39	37,24
HAR 25%-20	3.363.750,00	7,87	2.339,65	28,99
	3.363.750,00	7,83	2.329,07	28,69
	3.386.250,00	7,90	2.331,69	29,86
HAR 50%-20	3.375.000,00	7,77	2.301,96	29,74
	3.375.000,00	7,77	2.300,74	29,00
	3.375.000,00	7,80	2.311,11	30,86
HAR 75%-20	3.375.000,00	7,72	2.287,64	31,42
	3.375.000,00	7,74	2.294,34	30,47
	3.375.000,00	7,71	2.285,66	29,42
HAR 100%-20	3.375.000,00	7,47	2.213,66	43,08
	3.375.000,00	7,47	2.213,57	43,23
	3.386.250,00	7,50	2.215,96	42,67

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.7, presenta las mediciones de las dimensiones tomadas a las probetas de hormigón árido tamaño 40mm, utilizadas para el ensayo a compresión, después de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.7 Dimensiones probetas de hormigón árido tam. máx. 40mm después H-D.

Nombre H°		a (mm)	b (mm)	h (mm)	Area cara A.F (mm2)
HC-40	Probeta 1	151,00	151,50	151,00	22.876,50
	Probeta 2	150,50	151,50	150,75	22.800,75
	Probeta 3	150,50	151,00	151,75	22.725,50
HAd-40	Probeta 1	150,00	150,50	150,00	22.575,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	149,50	150,00	22.425,00
HAR 25%-40	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	150,50	150,00	150,00	22.575,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 50%-40	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	149,50	150,00	150,00	22.425,00
	Probeta 3	149,50	151,00	150,00	22.574,50
HAR 75%-40	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00
HAR 100%-40	Probeta 1	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 2	150,00	150,00	150,00	22.500,00
	Probeta 3	150,00	150,00	150,00	22.500,00

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.8, presenta las propiedades físicas calculadas a las probetas de hormigón árido tamaño 40mm, utilizadas para el ensayo a compresión, después de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.8 Prop. físicas hormigón árido tam. máx. 40mm después H-D.

Nombre H°	Volúmen (mm ³)	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia cubo 150 mm (Mpa)
HC-40	3.454.351,50	8,08	2.338,21	56,18
	3.437.213,06	8,11	2.360,05	50,85
	3.448.594,63	8,18	2.371,11	47,79
HAd-40	3.386.250,00	7,66	2.261,85	33,47
	3.375.000,00	7,54	2.235,53	34,14
	3.363.750,00	7,52	2.236,73	34,89
HAR 25%-40	3.375.000,00	7,87	2.331,73	47,88
	3.386.250,00	7,88	2.326,64	49,28
	3.375.000,00	7,95	2.354,52	51,30
HAR 50%-40	3.375.000,00	7,80	2.310,90	42,27
	3.363.750,00	7,79	2.316,94	41,17
	3.386.175,00	7,83	2.312,02	42,18
HAR 75%-40	3.375.000,00	7,68	2.275,73	42,86
	3.375.000,00	7,69	2.277,30	45,77
	3.375.000,00	7,69	2.279,97	43,23
HAR 100%-40	3.375.000,00	7,66	2.270,31	36,78
	3.375.000,00	7,61	2.254,49	36,48
	3.375.000,00	7,61	2.254,37	34,89

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.9, presenta las mediciones realizadas a las probetas de hormigón árido tamaño 20mm, utilizadas para el ensayo a compresión, antes de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.9 Permeabilidad en hormigón árido tamaño máx. 20mm antes H-D.

Nombre H°	Lado 1 (mm)	Lado 2 (mm)	Promedio (mm)
HC-20			
Probeta 1	28	35	31,5
Probeta 2	20	21	20,5
Probeta 3	16	17	16,5
HAd-20			
Probeta 1	32	37	34,5
Probeta 2	40	46	43
Probeta 3	37	39	38
HAR 25%-20			
Probeta 1	30	30	30
Probeta 2	35	34	34,5
Probeta 3	25	20	22,5
HAR 50%-20			
Probeta 1	32	36	34
Probeta 2	22	21	21,5
Probeta 3	35	34	34,5
HAR 75%-20			
Probeta 1	40	38	39
Probeta 2	42	49	45,5
Probeta 3	40	40	40
HAR 100%-20			
Probeta 1	32	27	29,5
Probeta 2	48	47	47,5
Probeta 3	37	38	37,5

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.10, presenta las mediciones realizadas a las probetas de hormigón árido tamaño 40mm, utilizadas para el ensayo a compresión, antes de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.10 Permeabilidad hormigón árido tam- máx. 40mm antes H-D.

Nombre H°	Lado 1 (mm)	Lado 2 (mm)	Promedio (mm)
HC-40			
Probeta 1	31	34	32,5
Probeta 2	25	25	25
Probeta 3	25	20	22,5
HAd-40			
Probeta 1	35	37	36
Probeta 2	30	30	30
Probeta 3	30	30	30
HAR 25%-40			
Probeta 1	68	70	69
Probeta 2	75	74	74,5
Probeta 3	40	30	35
HAR 50%-40			
Probeta 1	37	40	38,5
Probeta 2	30	30	30
Probeta 3	30	30	30
HAR 75%-40			
Probeta 1	47	44	45,5
Probeta 2	39	34	36,5
Probeta 3	41	47	44
HAR 100%-40			
Probeta 1	47	45	46
Probeta 2	53	54	53,5
Probeta 3	40	42	41

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.11, presenta las mediciones realizadas a las probetas de hormigón árido tamaño 20mm, utilizadas para el ensayo a compresión, después de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.11 Permeabilidad en hormigón árido tam. máx. 20mm después H-D.

Nombre H°		Lado 1 (mm)	Lado 2 (mm)	Promedio (mm)
HC-20	Probeta 1	22	25	23,5
	Probeta 2	17	21	19
	Probeta 3	19	20	19,5
HAd-20	Probeta 1	30	30	30
	Probeta 2	37	34	35,5
	Probeta 3	34	28	31
HAR 25%-20	Probeta 1	43	44	43,5
	Probeta 2	56	60	58
	Probeta 3	67	70	68,5
HAR 50%-20	Probeta 1	70	74	72
	Probeta 2	76	77	76,5
	Probeta 3	80	80	80
HAR 75%-20	Probeta 1	56	47	51,5
	Probeta 2	58	57	57,5
	Probeta 3	50	49	49,5
HAR 100%-20	Probeta 1	35	34	34,5
	Probeta 2	34	35	34,5
	Probeta 3	29	30	29,5

Fuente: Propia, 2015

La Tabla 11.12, presenta las mediciones realizadas a las probetas de hormigón árido tamaño 20mm, utilizadas para el ensayo a compresión, después de someter al hormigón a ciclos hielo deshielo.

Tabla 11.12 Permeabilidad en hormigón arido tam. máx. 40mm DH-D.

Nombre H°		Lado 1 (mm)	Lado 2 (mm)	Promedio (mm)
HC-40				
	Probeta 1	15	16	15,5
	Probeta 2	11	17	14
	Probeta 3	15	17	16
HAd-40				
	Probeta 1	26	27	26,5
	Probeta 2	21	19	20
	Probeta 3	28	26	27
HAR 25%-40				
	Probeta 1	70	72	71
	Probeta 2	81	77	79
	Probeta 3	35	33	34
HAR 50%-40				
	Probeta 1	37	40	38,5
	Probeta 2	32	34	33
	Probeta 3	39	30	34,5
HAR 75%-40				
	Probeta 1	45	45	45
	Probeta 2	74	72	73
	Probeta 3	43	41	42
HAR 100%-40				
	Probeta 1	90	89	89,5
	Probeta 2	44	47	45,5
	Probeta 3	37	39	38

Fuente: Propia, 2015

Anexo B : Seguimiento a ciclos hielo-deshielo

La Tabla 11.13, muestra la cantidad de ciclos hielo-deshielo aplicados a cada uno de los tratamientos en esta investigación.

Tabla 11.13 Control ciclos hielo-deshielo

Tamaño máx.	Cantidad de ciclos aplicados					
Tratamiento	HC	HAd	HAR 25%	HAR 50%	HAR 75%	HAR 100%
20 mm.	50	50	50	50	50	50
40 mm.	50	50	50	50	50	50

Fuente: Propia, 2015