



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE  
HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO MEDIANTE LA  
MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE MEZCLADO DEL HORMIGÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

JULIE ANNE CHAUVEINC

Profesor Guía:  
Federico DELFIN ARIZTIA

Miembros de la Comisión:  
Yuri TOMICIC CALVO  
Carlos AGUILERA GUTIERREZ

SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE 2011

## **AGRADECIMIENTOS**

Al finalizar esta memoria, quisiera primero agradecer a todos los que me apoyaron durante este trabajo, mi familia aunque está lejos de mí, mis amigos en Chile y Francia, especialmente mi compañera de departamento Caroline por su apoyo incondicional y Matías por las correcciones y el apoyo.

Agradezco a mi profesor guía, Don Federico Delfín, por todo el apoyo, colaboración, ayuda y disposición entregados para que este Trabajo de Título llegará a su fin.

Agradezco también a Don Carlos Arcos, cuya ayuda fue más que clave, y quien nunca dudo en ayudarme y apoyarme a lo largo del proceso experimental realizado.

Agradezco además a Julio Nuñez y su equipo de la Sección de Hormigones del IDIEM, que me ayudaron desinteresadamente, y fueron clave al realizar este estudio experimental.

Agradezco a la empresa Pétreos Quilín, especialmente los ingenieros Cristóbal Paul y Sebastián Faure, y también al IDIEM, por apoyar y aportar con materiales y sus instalaciones para la realización de esta memoria.

**RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: JULIE CHAUVEINC  
FECHA: 2011  
PROF. GUÍA: Sr. FEDERICO DELFÍN A.**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE HORMIGONES FABRICADOS  
CON ÁRIDO RECICLADO, MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DEL METODO DE  
MEZCLADO DEL HORMIGON”**

La preocupación por el desarrollo de materiales más amigables con el Medio Ambiente en el ámbito de la construcción ha impulsado una toma de conciencia en todos los niveles. La idea de reciclar el hormigón desechado, usándolo como árido para nuevo hormigón, forma parte de este proceso de gestión sustentable al que el mundo está apuntando. A la fecha, se han realizado varios estudios sobre este material, sobre todo en Estados Unidos y Europa. De esta forma, investigar las características y potenciales beneficios del hormigón con árido reciclado en Chile parece la continuación lógica de esta puesta en marcha.

El objetivo del presente Trabajo de Título es constatar y analizar la influencia de la modificación del proceso de fabricación de hormigones con árido reciclado, cuantificando el aporte del uso de árido reciclado en términos de costo, tiempo, y sustentabilidad. Para esto, se elaboraron hormigones con 0%, 30%, y 50% de árido reciclado grueso mediante dos métodos de mezclado. El primer método corresponde al mezclado convencional en una etapa, en el cual el orden de adición de los componentes es árido, cemento, porción del agua y finalmente el resto de ellos. El segundo método corresponde a un mezclado en dos etapas, en las cuales primero se mezclan el cemento y el árido reciclado con la mitad del agua necesaria, y luego se añade el árido virgen y el resto del agua. El diseño de las mezclas contempló el ajuste del contenido de agua para lograr un cono de 6-8 cm y una razón A/C de 0.58 aproximadamente.

Comparando las resistencias a compresión a 4, 7 y 28 días, se concluye lo siguiente: como se esperaba, mientras más alto el contenido de árido reciclado, más baja la resistencia a compresión; por otro lado, el método de mezclado en etapas no mejoró la resistencia a compresión de los hormigones con árido reciclado (ocurrió lo contrario). Sin embargo, se lograron valores de resistencia a compresión altos y suficientes para usar este material como hormigón estructural. En cuanto a impermeabilidad, se concluye que, al mezclar en etapas los hormigones reciclados, se mejoró su capacidad a no absorber el agua en el caso del hormigón con 50% de árido reciclado; sin embargo, en los otros casos, el resultado no fue tan concluyente como en este. Por lo tanto, la modificación del método de mezclado no resultó eficiente al mejoramiento de las propiedades del hormigón, pero eso no excluye el uso, incluso estructural, del hormigón reciclado como árido.

# Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	2
CAPITULO 1 Introducción .....	7
1.1    Introducción.....	7
1.2    Objetivos .....	9
1.2.1    Objetivos generales.....	9
1.2.2    Objetivos específicos.....	9
1.3    Alcances.....	10
CAPITULO 2 Antecedentes .....	11
2.1    El hormigón reciclado .....	11
2.1.1    ¿Por qué reciclar el hormigón?.....	11
2.1.2    ¿Cómo se recicla el hormigón? .....	12
2.1.3    Propiedades de áridos reciclados provenientes de hormigón .....	13
2.2    Estructura del hormigón.....	15
2.2.1    Introducción.....	15
2.2.2    Áridos .....	16
2.2.3    Materiales cementíceos.....	17
2.2.4    Micro estructura: zona de contacto cemento/árido.....	18
2.3    Mezclado del hormigón.....	19
2.3.1    Introducción.....	19
2.3.2    Efectos del mezclado en las propiedades del hormigón .....	19
2.3.3    Normativa Chilena de mezclado de hormigones de laboratorio .....	20
2.3.4    Aplicación del proceso de mezclado en dos etapas al hormigón reciclado .....	20
2.4    Propiedades del hormigón .....	23
2.4.1    Introducción.....	23
2.4.2    Resistencia a compresión.....	23
2.4.3    Durabilidad e impermeabilidad .....	24

CAPITULO 3 Programa experimental .....	26
3.1    Introducción.....	26
3.2    Planteamiento de la investigación.....	26
3.3    Definición de las variables .....	27
3.4    Obtención del material reciclado.....	28
CAPITULO 4 Desarrollo experimental .....	31
4.1    Introducción.....	31
4.2    Caracterización de los materiales .....	31
4.2.1    Áridos reciclados .....	31
4.2.2    Áridos naturales.....	33
4.2.3    Áridos totales.....	33
4.2.4    Cemento.....	35
4.2.5    Agua.....	35
4.3    Dosificaciones .....	35
4.3.1    Dosificación teórica.....	35
4.3.2    Dosificación final.....	37
4.4    Elaboración de hormigones .....	40
4.4.1    Mezclado tradicional .....	41
4.4.2    Mezclado en etapas.....	41
4.4.3    Fabricación de probetas cúbicas .....	42
4.5    Programa de ensayos.....	44
4.5.1    Ensayos en hormigón fresco .....	44
4.5.2    Ensayo de compresión .....	46
4.5.3    Ensayo de impermeabilidad.....	47
CAPITULO 5 Resultados .....	49
5.1    Propiedades del hormigón fresco .....	49
5.2    Propiedades del hormigón endurecido.....	50
5.2.1    Ensayo de compresión a 4, 7 y 28 días .....	50
5.2.2    Ensayo de impermeabilidad.....	51

CAPITULO 6 Análisis de resultados .....	52
6.1 Propiedades del hormigón fresco .....	52
6.1.1 Asentamiento y mantención de cono .....	52
6.1.2 Densidad .....	54
6.1.3 Contenido de aire .....	55
6.2 Resistencia a compresión.....	56
6.2.1 Compresión a 4 días.....	56
6.2.2 Compresión a 7 días.....	57
6.2.3 Compresión a 28 días.....	57
6.2.4 Análisis de resultados de los ensayos de resistencia a compresión .....	58
6.2.5 Estudio del tipo de fallas.....	61
6.3 Impermeabilidad .....	63
CAPITULO 7 Conclusiones y recomendaciones .....	65
CAPITULO 8 Bibliografía .....	67
ANEXOS.....	69

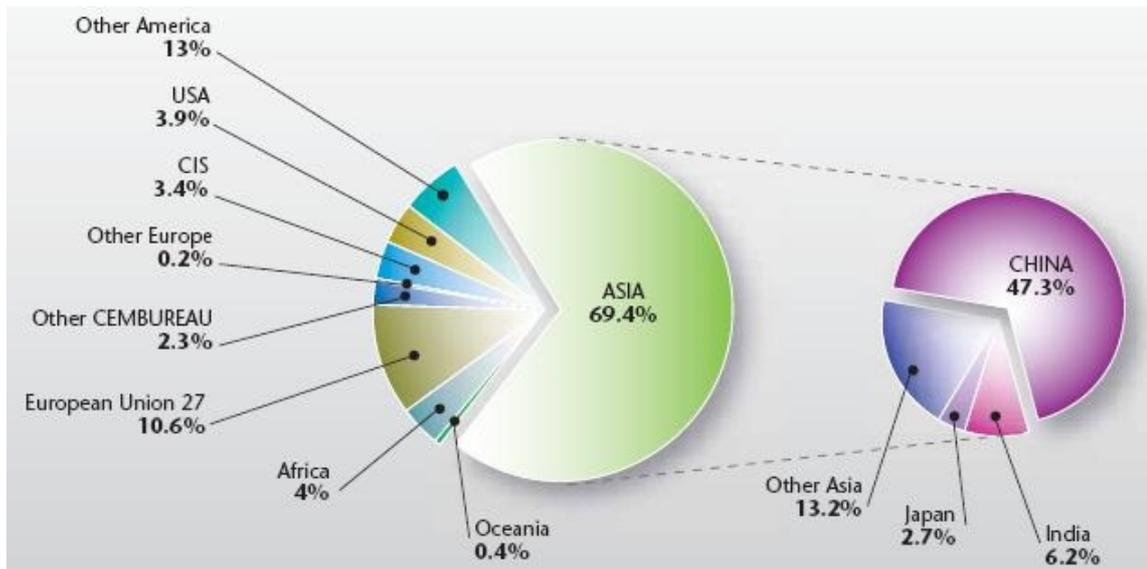
# CAPITULO 1 Introducción

## 1.1 Introducción

Cuando se piensa en desechos y reciclaje, es más común preocuparse de residuos como bolsas plásticas, vidrios y desechos domiciliarios, que del hormigón. De hecho, no se considera como un problema público, ya que no es un residuo tóxico o peligroso. Sin embargo, el hormigón representa una parte no despreciable de los desechos industriales, públicos y colectivos generados cada año en el mundo.

El hormigón es el material más usado en el mundo después del agua: aproximadamente 25 mil millones de toneladas de hormigón se producen cada año, lo que equivale a 6 millones de camionadas de hormigón por día<sup>1</sup>.

En la siguiente figura se presenta la repartición de la producción de hormigón a nivel mundial:



**Figura 1 : Producción mundial de hormigón<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> CSI Cement Sustainability Initiative. Recycling Concrete Full Report. July 2009

De la figura 1, es claro que es en Asia en donde se producen casi dos tercios del hormigón mundial, lo que explica su alto nivel de participación en el estudio y la investigación respecto del mejoramiento del ciclo de vida de este material.

El hormigón tiene una vida útil bastante larga; en general, las estructuras de hormigón se destruyen porque ya no son útiles, y no porque estén desgastadas. Es por eso que la necesidad de cambio y modernización genera una cantidad de desechos considerable en todos los países del mundo. Se estima que aproximadamente 912 millones de toneladas de desechos proveniente de la construcción son producidos cada año solo en Europa, Estados Unidos y Japón<sup>2</sup>.

Básicamente, el hormigón es un material compuesto de áridos incorporados en la pasta de cemento; no es posible transformarlo de nuevo en cemento ya que es difícil limpiarlo de los áridos. Así, su reciclaje no aporta directamente a una disminución de las emisiones de carbono relacionadas a la producción del cemento, que representan la mayor parte de las emisiones de carbono en el proceso de fabricación y de utilización del hormigón. No obstante, permitiría disminuir el tamaño de los espacios destinados a albergar los residuos no reutilizables (vertederos), y a su vez recuperar los materiales utilizados que se encuentren en la estructura a ser demolida, lo que implicaría directamente una reducción de la huella de carbono asociada al transporte de los áridos nuevos desde los pozos hasta la obra.

De manera general, el hormigón reciclado se reduce a pequeños trozos para servir como sub-base de pavimentos o consolidar infraestructuras. Los expertos estiman que aproximadamente 20% del árido usado actualmente podría técnicamente ser reemplazado por árido reciclado<sup>3</sup>.

Considerando la información anterior, es posible decir que el reciclaje del hormigón se ha vuelto en una alternativa económica y ambiental de gran valor e interés, tanto para impedir un desperdicio importante de los materiales usados como para reducir la explotación inútil de las fuentes de áridos naturales.

Para producir hormigones de calidad estructural, se deben cumplir ciertos requisitos tanto por parte del cemento como de los áridos. Sin embargo, los áridos producidos al reciclar el hormigón son de menor calidad que los áridos vírgenes, lo que conlleva a complicaciones en el nuevo hormigón (alta demanda de agua, resistencia a la compresión levemente más baja, etc.). Para compensar esas debilidades se ha pensado en distintas soluciones, como el tratamiento previo de los áridos. Dentro de estas soluciones aparece también la posibilidad

---

<sup>2</sup> CSI Cement Sustainability Initiative. *Recycling Concrete Full Report*. July 2009

<sup>3</sup> <http://www.greenunivers.com/2009/08/le-beton-des-montagnes-a-recycler-10646/>

de modificar el proceso de fabricación del hormigón, escalonando en dos etapas el mezclado de la pasta de hormigón se permite una saturación optimizada de los áridos, lo que involucra una mejor adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de árido, y por ende una mejor resistencia del producto final.

Así, al desarrollar este trabajo de título, se tomaron todas estas variables en consideración para analizar la evolución de las propiedades mecánicas de hormigones hechos con áridos reciclados mediante el mejoramiento del proceso de mezclado.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos generales**

Constatar y analizar la influencia de la modificación del proceso de fabricación de hormigón de calidad estructural con árido reciclado

Cuantificar el aporte del uso de árido reciclado en la producción de hormigón en términos de costo, tiempo, y sustentabilidad

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Observar el mejoramiento o decaimiento de propiedades físicas y mecánicas de un hormigón hecho con árido reciclado al modificar el proceso de fabricación del hormigón

Determinar los límites de uso de este tipo de árido para hormigón estructural

Determinar la eficiencia del procedimiento de mezclado en dos etapas para el uso de árido reciclado en hormigón estructural.

### **1.3 Alcances**

El cemento utilizado en este estudio es un cemento Portland Puzolánico de alta resistencia de la marca Melón Extra.

Los áridos gruesos de hormigón reciclado son procedentes de probetas cúbicas descartadas después de sus ensayos en el laboratorio del IDIEM, probetas seleccionadas de hormigón H30 y por sobre este valor de resistencia, de cemento Melón y áridos de la Región Metropolitana. Estos materiales fueron procesados en la empresa de áridos Quilín.

Los áridos naturales (gruesos y finos) usados como material de referencia (virgen) proceden de Río Maipo.

Así, este estudio no contempla casa de hormigón reciclado de obras de demolición que por su mayor variabilidad no sería comparable con los de la presente investigación.

## CAPITULO 2 Antecedentes

### 2.1 El hormigón reciclado

#### 2.1.1 ¿Por qué reciclar el hormigón?

Una tendencia global, tanto en la industria de la construcción como en cualquier industria, es la preservación y la protección del medioambiente, mediante un desarrollo sustentable. La construcción es una industria como cualquier otra, y por lo mismo se considera, cada vez más, tomar las medidas pertinentes para lograr una producción más amigable con el Medio Ambiente.

Siendo el hormigón el material más utilizado en el área de la construcción, es natural que la idea de reciclarlo apareciera como una necesidad para la viabilidad ecológica del rubro; luego, la idea de reciclarlo como árido en nuevo hormigón surgió como parte de una solución prometedora para preservar el Medio Ambiente. Hoy en día, se ha vuelto una realidad factible, con la participación de toda la industria cementera, para ser parte de un desarrollo sustentable.

La experiencia de los países europeos, de los Estados-Unidos y de algunos países asiáticos, donde ya se recicla gran parte del hormigón, existiendo normativas y reglas de uso, es amplia y puede servir para promover este uso acá en Chile: con residuos utilizables en geotecnia, carreteras o en estructuras.

Existen dos razones principales impulsando el reciclaje del hormigón. Primero, las cantidades de hormigón usado que van a botadero son muy importantes; además, la falta de organización y de cuidado en la construcción conduce a este desperdicio de hormigón: según un estudio de la Pontificia Universidad Católica, aproximadamente 30% de los materiales se desperdician al construir<sup>4</sup>. Luego, para aprovechar este recurso y no dejar que se pierda tanto material y tanto espacio, la reutilización del hormigón como árido parece muy adecuada.

El segundo argumento a favor guarda relación con la escasez de materias primas como los áridos, provocada por la gran demanda de recursos básicos.

Sin embargo, es necesario destacar que el reciclaje del hormigón tiene poco impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero puesto que la mayoría de las emisiones se

---

<sup>4</sup> Revista del GPUC. Ingeniería Civil y Construcción, Pontificia Universidad Católica. <[www.ing.puc.cl](http://www.ing.puc.cl)>

generan al producir el cemento, que no puede ser reciclado. De esta forma, los principales efectos del reciclaje del hormigón están orientados a la disminución de la explotación de los recursos naturales, a la disminución de la utilización de tierras como botaderos y a un mejor control de los costos asociados al transporte de las materias primas.

Ahora bien, a parte del reciclaje de hormigón usado, también existe la posibilidad de reutilizar el hormigón fresco no usado (lo que se devuelve a la planta de mezcla), con equipos adecuados en los sitios de producción. Hoy en día, más de 125 mil millones de toneladas de hormigón fresco devuelto se generan cada año<sup>5</sup>.

Por lo tanto, reciclar el hormigón como árido nuevo es una realidad concreta en el mundo de la construcción, cada día más factible.

### 2.1.2 ¿Cómo se recicla el hormigón?

El reciclaje del hormigón usado consiste en romper el hormigón existente, traerlo a una planta adaptada, luego triturarlo y usarlo como árido en la nueva pasta de cemento. Su uso predominante es en sub-base de pavimento, como agregado pétreo, pero también se puede usar en nuevo hormigón, que sea estructural o no.

Si los escombros de hormigón provienen de hormigón armado, es necesario hacerle un tratamiento específico al quitar las armaduras, lo que vuelve el proceso bastante más caro. Es por esta razón económica que se puede reciclar en prioridad hormigón no armado usado en pavimentos u otros. Luego, el hormigón sólo se procesa en una planta chancadora que lo tritura para llegar a un tamaño aceptable, según los requisitos exigidos.

A continuación se presenta un ejemplo del proceso de fabricación de áridos reciclados<sup>6</sup>:



1. Selección de los productos en obras



2. Tratamiento y preparación de los materiales previa a la trituración

<sup>5</sup> CSI Cement Sustainability Initiative. *Recycling Concrete Full Report*. July 2009

<sup>6</sup> <http://www.lebetonrecycle.com/process-de-fabrication.html>



3. Selección manual



4. Separación de los fierros



5. Trituración



6. Chancador



7. Almacenamiento de los materiales



8. Carga y despacho de los materiales

**Figura 2 Proceso de obtención del árido reciclado**

El uso predominante de los áridos hechos a partir de hormigón reciclado es como reemplazo parcial o total del árido grueso, sea éste grava o gravilla; se usa poco como parte del árido fino, debido a su gran demanda de agua.

### **2.1.3 Propiedades de áridos reciclados provenientes de hormigón**

Hoy en día las propiedades principales de los áridos reciclados procedentes de hormigón son bastante conocidas, ya que se han hecho varios estudios sobre el tema.

Los áridos reciclados tienen como propiedad crítica principal su alto nivel de absorción: la demanda de agua y el consumo de cemento del hormigón fresco con árido reciclado son siempre mayores que los de hormigón hecho con grava natural. Esto se debe a la presencia de mortero y otras sustancias adheridas a la superficie de las partículas del árido, que tienden a aumentar la absorción de los áridos al ser menos puros. De hecho, el antiguo mortero que queda pegado a la superficie del árido virgen es la principal causa de muchas de las debilidades del árido reciclado.

En relación con la porosidad y la absorción del hormigón hecho con una misma dosificación, estas dos propiedades aumentan en el hormigón reciclado, dependiendo de la porosidad y de la absorción del hormigón del cual provienen los áridos reciclados. No obstante, de manera general, se considera que el árido reciclado incluye material más poroso que un árido normal, debido a su formación y a la presencia de mortero adherido a su superficie.

Por otra parte, la densidad del hormigón con áridos reciclados es siempre inferior (hasta un 20% menor) que la del hormigón de referencia, tanto como el módulo de elasticidad (entre un 15 y un 40%).

Finalmente, la resistencia a la compresión no varía de manera significativa si se reemplaza menos de un 30% del árido natural por árido reciclado; si se incorpora una fracción mayor de árido reciclado estos parámetros pueden disminuir hasta en un 20%. De la misma manera, reemplazando hasta un 20% del árido, la retracción y la fluencia no varían significativamente, aunque pueden aumentar hasta un 50% en promedio si el 100% del árido es reciclado<sup>7</sup>.

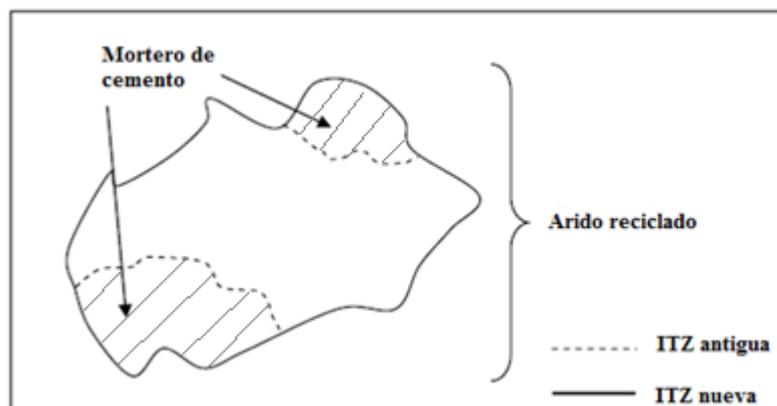
En cuanto a la calidad de los áridos, de acuerdo con estudios anteriores, se clasifican según su tasa de absorción<sup>8</sup>: mientras más baja sea la tasa de absorción de un árido reciclado, mejor su calidad. Tasas de absorción altas indican un alto nivel en mortero de cemento adherido, lo que generalmente conduce a un hormigón con menor resistencia, durabilidad, y con propiedades de retracción (“shrinkage”) y deformación más altas. Esto se explica mirando la zona de transición interfacial (ITZ), que es la zona de contacto entre la superficie del árido y la pasta de cemento. En efecto, la ITZ difiere entre un árido virgen y un árido reciclado, y representa uno de sus puntos débiles. En el caso del árido reciclado, la presencia de mortero de cemento adherido, quedando después del chancado, altera y dificulta la adherencia del árido con la pasta de cemento, lo que influye sobre muchas propiedades del árido reciclado, como se explicó con anterioridad.

---

<sup>7</sup> Alaejos Gutiérrez, Pilar. *Tipos y Propiedades de Áridos Reciclados en Catálogo de Residuos utilizables en Construcción. Informe CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente, 2008*

<sup>8</sup> W.Y.V. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam. *Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and Concrete Research 35(6), Hong-Kong, 2005.*

A continuación se muestra una esquematización de esta zona:



**Figura 3 Zona de interfaces de árido reciclado**

En resumen, todavía existen varias dificultades al controlar la calidad de los áridos procedentes del reciclaje del hormigón, que se explican por las dos siguientes razones: primero, los desechos de hormigón siempre están contaminados con materiales ajenos; segundo, las partículas de árido reciclado siempre tienen una cantidad relevante de mortero adherido. En consecuencia, se imponen requisitos y normas para regular el uso de áridos reciclados y asegurar su buen comportamiento en el nuevo hormigón, y se buscan soluciones para mejorar las propiedades de este tipo de árido, como el tratamiento químico o la saturación previa de los áridos<sup>9</sup>.

## 2.2 Estructura del hormigón

### 2.2.1 Introducción

El hormigón se define de manera general como una masa de construcción producto de la mezcla de un aglomerante (cemento) con un material pétreo inerte (áridos), mediante la utilización de agua.

El cemento es el componente activo de la mezcla de hormigón; tiene como función principal la de aglomerar los áridos, para formar una pasta homogénea y cohesiva. Proporciona la resistencia mecánica de la pasta de hormigón endurecida.

<sup>9</sup> SALAS Andres, ROESLER Jeffery, LANGE David. *Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements*. University of Illinois at Urbana-Champaign – EE.UU., Abril 2010.

Por su parte, los áridos se dividen entre el árido grueso (grava, gravilla) y el árido fino (arena). Forman el esqueleto inerte de la estructura y proporcionan rigidez al hormigón; son responsables de la durabilidad y estabilidad del hormigón en el tiempo. El agua confiere plasticidad y trabajabilidad en estado fresco, además de hidratar al aglomerante y ayudar en el curado del hormigón. Finalmente, a estos componentes básicos se pueden añadir aditivos para mejorar algunas propiedades del hormigón.

La estructura de la pasta de hormigón es bastante compleja, sobre todo al observar la zona de transición interfacial, donde la pasta de cemento rodea la partícula de árido. Esta zona puede ser un punto débil en la pasta de hormigón, debido a la complejidad de las reacciones químicas que pueden ocurrir a lo largo de su superficie, tanto necesarias como nocivas para la buena homogeneidad del hormigón y para evitar su agrietamiento en el futuro.

### **2.2.2 Áridos**

Como se dijo previamente, los áridos forman el esqueleto duro del hormigón, representando aproximadamente tres cuartos del volumen del hormigón total. Permiten darle resistencia al hormigón y evitan la retracción de la pasta de cemento. El objetivo principal es de tener un volumen de huecos mínimo a rellenar con la pasta de cemento, lo que implica una mayor finura y una granulometría adecuada.

Además, las características de los áridos influyen directamente sobre algunas propiedades del hormigón del cual forman parte. Por ejemplo, la durabilidad del hormigón depende en gran parte de la porosidad, de la dureza, del módulo de elasticidad y del coeficiente de dilatación volumétrico del árido. De la misma manera, la resistencia y la adherencia de la mezcla de hormigón está vinculada con la calidad, la limpieza y la textura de la superficie de las partículas de árido. Además, la retracción y la fluencia lenta del hormigón dependen del módulo elástico, de la forma, de la granulometría y del tamaño máximo de aquellas partículas; también influye el contenido de material arcilloso. Finalmente, muchas propiedades intrínsecas del hormigón tienen relación con las características volumétricas, geométricas y mecánicas del árido utilizado. Entre ellas, los factores de mayor influencia sobre la calidad del hormigón son los siguientes: la presencia de impurezas (arcilla, cloruros y sulfatos, etc.), la granulometría, y la densidad del árido.

En consecuencia, la caracterización de los áridos es relevante para la calidad del hormigón y existen restricciones; estos requisitos generales para los áridos se pueden encontrar en las siguientes normas: la NCh163 Of.79 (correspondiendo a la ASTM C33).

### 2.2.3 Materiales cementíceos

El cemento es el componente “noble” del hormigón, siendo el material que permite su existencia. Se presenta como un polvo gris (o blanco en el caso del cemento blanco) que, al dispersarse y reaccionar químicamente con el agua, forma una pasta plástica moldeable que endurece con el tiempo.

Se compone de un material pulverizado producto de la calcinación y clinkerización de una mezcla mineral de calizas (aproximadamente 80%<sup>10</sup>) y arcillas (un 20%). El resultado da un polvo gris llamado clinker. Finalmente, a este material pulverizado se le incorpora yeso, que actúa como retardador y regularizador de fraguado. El cemento así obtenido se llama Cemento Portland, que es el de más corriente utilización.

Luego, al mezclar el polvo de cemento con una cantidad conveniente de agua, se forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo agua como aire. Es lo que da al hormigón su resistencia y su dureza. Sin embargo, durante una duración determinada, la pasta de hormigón guarda su plasticidad lo que permite moldearla y colocarla donde se requiere. A lo largo de todo este proceso, las reacciones químicas entre el agua y la pasta de cemento proveen el endurecimiento de la pasta de hormigón, generando calor.

Las características relevantes del cemento para controlar su buena calidad son: su finura, que acelera la reacción agua/cemento al aumentar la superficie de contacto, y entonces acelera la toma de resistencia; su temperatura al mezclar con el agua, que acelera la reacción química; el tiempo de fraguado, fenómeno durante lo cual la pasta deja de ser plástica y adquiere rigidez tal que no admite moldearse; su densidad; su calor de hidratación, que tiene bastante importancia en estructuras masivas para el desarrollo de la resistencia mecánica; y por fin su composición química, ya que los productos ajenos generan inestabilidad de volumen y otros efectos nocivos para la pasta de cemento.

---

<sup>10</sup> DE LARRARD François. *Construire en béton. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Novembre 2002.*

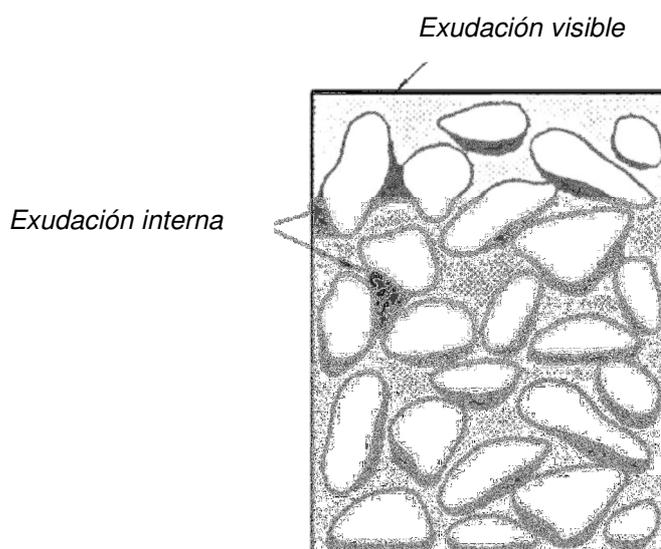
## 2.2.4 Micro estructura: zona de contacto cemento/árido

La zona de contacto entre las partículas de árido y la pasta cementicia tiene una estructura muy particular, distinta del resto de la pasta, y bastante importante en el desarrollo de la resistencia del hormigón. De hecho, esta zona consiste en pasta de cemento hidratado con mayor porosidad y cristales más grandes, lo que la vuelve menos resistente.

Como ya se ha explicado, el hormigón se puede describir como un sistema de dos fases: una es sólida, compuesta de las partículas de áridos; la otra es la matriz de pasta de cemento. Entonces, los granos de áridos están separados por una capa delgada de pasta de cemento, lo que provoca el fenómeno de exudación interna.

La exudación se define como la segregación del agua por efecto de la decantación de los materiales sólidos. Se explica por el hecho de que el hormigón está constituido por materiales de distinto peso específico. En el caso específico de la zona de interface entre las partículas de áridos y la pasta gel de cemento, la exudación interna se acumula bajo la superficie de los áridos grandes y alargados (Figura 4). Es esos lugares, la zona de transición árido - pasta de cemento tiende a ser débil y propensa a microfisuras. Esto produce una mayor permeabilidad del hormigón con respecto a la pasta de cemento, y entonces una menor resistencia del hormigón total en comparación con la de la pasta de cemento<sup>11</sup>.

A continuación se muestra un esquema de este fenómeno:



**Figura 4 Esquemización de las zonas de exudación**

<sup>11</sup> VIDELA, C. *Antecedentes Generales del Hormigón en su Tecnología del Hormigón, Depto Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile*

Entonces, para entender bien el desarrollo de la resistencia a través del proceso de hidratación de la pasta de cemento es necesario entender las relaciones complejas que ocurren alrededor de los granos inertes de árido.

## **2.3 Mezclado del hormigón**

### **2.3.1 Introducción**

La mezcla del hormigón es una etapa crucial en la obtención de una pasta adecuada. El proceso de mezclado se considera eficiente cuando la mezcla obtenida es homogénea y muestra las características de trabajabilidad requeridas. Un buen mezclado permite una distribución pareja de sus partículas y una hidratación óptima del material cementíceo.

Sin embargo, algunas condiciones pueden afectar el buen mezclado, como la presencia de material cementíceo fino, bajas razones agua/cemento, o contenidos altos de elementos aglomerantes. Estas circunstancias producen la aglomeración de las partículas finas de cemento, lo que impide una hidratación uniforme de la pasta y afecta la trabajabilidad del hormigón. Además, el aseguramiento de los adecuados recubrimientos y dispersión de las partículas de árido también es un punto relevante de la operación de mezcla con la pasta cementicia.

De esta forma, el proceso de mezclado es tan importante en la calidad del hormigón como su dosificación. Por lo tanto, un mezclado en dos etapas parece responder a esta necesidad, dividiendo las operaciones para un mejoramiento de las propiedades mecánicas y químicas del hormigón mediante una hidratación más eficiente y una homogenización adecuada de la pasta.

### **2.3.2 Efectos del mezclado en las propiedades del hormigón**

El mezclado del hormigón es un proceso complejo dependiente de muchos factores, dentro de los cuales destacan la secuencia de carga de los materiales, el tiempo de mezcla y el tipo de mezclador<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> LATORRE OYANADEL Verónica Valeria. *Influencia del Contenido de Adiciones Puzolánicas y del Proceso de Elaboración de la Mezcla en la Resistencia Mecánica del Hormigón. Tesis. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009*

Este proceso influye de manera significativa en el comportamiento y en la calidad del hormigón, debido a que es en esta etapa en la que se distribuyen las partículas de cemento, agua y áridos, favoreciendo o dificultando el buen desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento.

El tiempo y la velocidad de mezclado influyen sobre la calidad de los hormigones: a mayor velocidad mejor calidad, ya que se produce mayor defloculación (el fenómeno de dispersión de las partículas dentro de la masa), lo que aumenta el desarrollo de la resistencia de la pasta y la vuelve más trabajable.

De hecho, lo que se busca al momento de mezclar la pasta de hormigón es principalmente acelerar y amplificar las reacciones de hidratación de las partículas de cemento, y mejorar la adherencia entre éstas y las de árido, lo que se logra aumentando la superficie expuesta de aquellas partículas. Así, tanto el fenómeno de defloculación como la hidratación previa de los áridos permiten mejorar estos procesos y lograr un hormigón de calidad superior.

### **2.3.3 Normativa Chilena de mezclado de hormigones de laboratorio**

La norma NCh1018 Of.77 de preparación de mezclas de prueba en laboratorio preconiza el siguiente procedimiento de mezclado de hormigón, al usar un mezclado mecánico: primero, se humedece el tambor del aparato de mezclado; luego, se mezcla la arena, el cemento, el aditivo insoluble y la adición (si se usa), hasta obtener una masa homogénea a la vista; después se añade toda la grava, y se mezcla hasta lograr su distribución uniforme en la masa. A este nivel, se agrega el agua y el aditivo soluble (si se usa) y se mezcla hasta tener un hormigón de apariencia homogénea y con el asentamiento deseado; finalmente, se revuelve durante 3 minutos, se deja reposar la mezcla 3 minutos y se vuelve a revolver por 2 minutos más.

Este procedimiento concuerda con el de la norma ASTM C192-69.

### **2.3.4 Aplicación del proceso de mezclado en dos etapas al hormigón reciclado**

Como se ha demostrado en estudios previos, el uso de árido reciclado al fabricar nuevo hormigón tiende a debilitarlo y disminuir sus propiedades de resistencia. Por ello, un

estudio<sup>13</sup> mostró la factibilidad y la utilidad de modificar el proceso de mezclado para mejorar aquellas propiedades del hormigón reciclado.

Luego de este estudio, varios autores estudiaron este nuevo sistema de fabricación del hormigón con árido reciclado. Para el desarrollo de trabajo de título, se utilizará como base el estudio del mezclado en etapas propuesto por Andrés Salas, Jeffery Roesler y David Lange del laboratorio de Ingeniería Civil de Newmark, University of Illinois, en su paper de abril del 2010: *Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements*<sup>14</sup>.

Este nuevo método de mezclado se llama “TSMA” (“Two-Stage Mixing Approach”, o Enfoque de Mezclado en Dos Etapas en español). Se desarrolló al notar la baja resistencia a compresión y la alta retracción del hormigón hecho con áridos reciclados, tanto como la amplia variabilidad y la alta absorción en agua de los mismos. Entonces, surgió la necesidad de optimizar aquellas propiedades básicas del hormigón reciclado, mediante una separación en dos etapas del proceso de fabricación del hormigón. El objetivo de esta división en dos fases es permitir una mejor saturación del árido reciclado y así mejorar la adherencia entre las partículas de áridos y la pasta cementicia.

El proceso se explica esquemáticamente en la siguiente figura:



**Figura 5 Presentación del sistema de mezclado TSMA<sup>15</sup>**

<sup>13</sup> W.Y.V. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam. *Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and Concrete Research 35(6), Hong-Kong, 2005.*

<sup>14</sup> SALAS Andres, ROESLER Jeffery R., LANGE David. *Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements. University of Illinois, Estados-Unidos, Abril 2010*

<sup>15</sup> SALAS Andres, ROESLER Jeffery R., LANGE David. *Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements. University of Illinois, Estados-Unidos, Abril 2010*

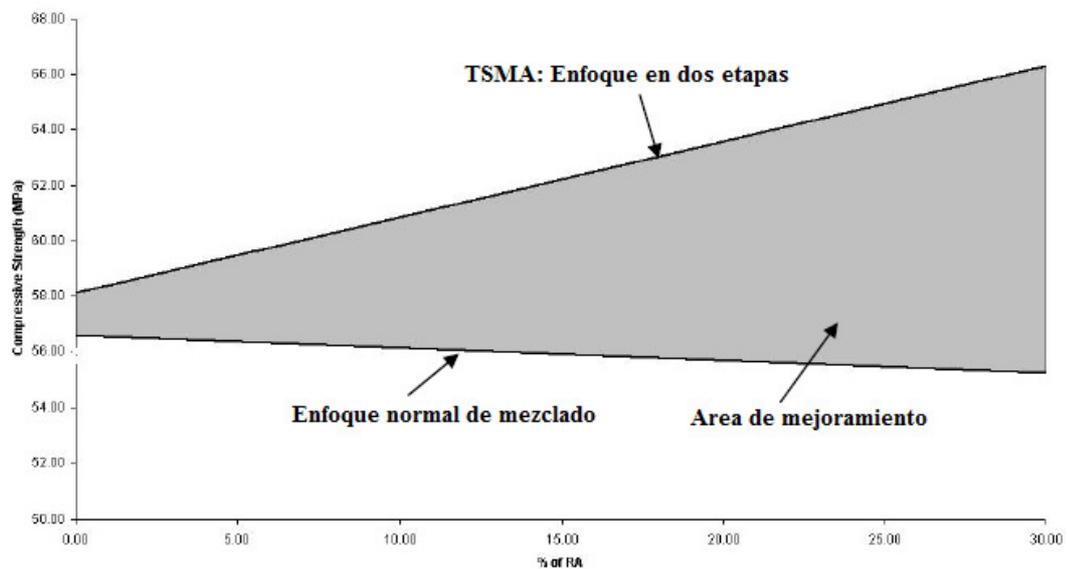
Esta técnica se basa en revestir previamente la partícula de árido con la pasta cemento para mejorar la uniformidad y la resistencia de la zona de transición interfacial.

En la primera etapa del mezclado, se usa la mitad del agua requerida al mezclar, lo que permite la formación de una capa delgada de cemento líquido; luego, esta capa penetra en el antiguo mortero adherido, muy poroso, y llena los antiguos huecos y fisuras. En la segunda etapa, se adjunta el agua que queda para completar el proceso de mezclado.

Los resultados mostraron que el hormigón así fabricado alcanza una mayor resistencia: por ejemplo, la resistencia a compresión a 28 días puede mejorarse hasta un 20% aproximadamente usando el TSMA en vez del proceso tradicional<sup>16</sup>. Este efecto se puede atribuir a la primera etapa de este proceso de mezclado que permite llenar los huecos y los poros, y así resulta un hormigón más denso, una zona de transición interfacial (ITZ) mejorada y luego una resistencia más alta en comparación con un proceso de mezclado tradicional.

Además, mientras mayor el porcentaje de árido reciclado, mayor el aumento de la resistencia final del hormigón hecho con TSMA.

A continuación se muestra un gráfico que comprueba aquellos resultados:



**Figura 6 : Resistencia a 28 días usando TSMA y mezclado normal<sup>17</sup>**

<sup>16</sup> W.Y.V. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam. Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research* 35(6), Hong-Kong, 2005

<sup>17</sup> W.Y.V. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam. Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research* 35(6), Hong-Kong, 2005.

En conclusión, se ha demostrado que este método de mezclado en dos etapas puede proporcionar un mejoramiento en la resistencia a compresión y otras propiedades mecánicas de un hormigón con árido reciclado, lo que serviría de sustento para promover un uso más amplio de éstos productos.

## **2.4 Propiedades del hormigón**

### **2.4.1 Introducción**

Entre las numerosas propiedades del hormigón, ya sea en estado fresco o endurecido, su resistencia y su permeabilidad representan variables importantes en el diseño y control de la calidad.

Primero, la resistencia da un panorama general de la calidad del hormigón, debido a que está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento, y muchas otras propiedades del hormigón (como su módulo de elasticidad o su impermeabilidad) están también íntimamente relacionadas con la resistencia. Además, los ensayos de resistencia son relativamente fáciles de hacer.

En lo que se refiere a la permeabilidad del hormigón, esta permite tener un buen juicio de su durabilidad, ya que está vinculada con la estructura de poros de la pasta de cemento y de los áridos. La durabilidad es muy relevante en cuanto a la resistencia, en el tiempo, del hormigón a las distintas acciones exógenas a las cuales puede estar expuesto, lo que puede ser tan importante como su resistencia mecánica.

Entonces, para caracterizar un hormigón parece apropiado estudiar ambas propiedades, lo que se hará en este trabajo de título.

### **2.4.2 Resistencia a compresión**

Fundamentalmente, la resistencia depende de dos factores: la estructura física de los productos de la hidratación y las proporciones volumétricas relativas de sus distintos componentes. Más precisamente, para un buen desarrollo de la resistencia de la pasta de cemento, las partículas de cemento deben tener el contacto suficiente con el agua de amasado, además de encontrar una adherencia óptima con los granos de árido.

Entonces, los principales factores que afectan a la resistencia mecánica son la razón agua/material cementíceo y la razón árido/cemento. La razón Agua/Cemento tiene influencia tanto en la porosidad de la pasta de hormigón como en su zona interfacial de transición. A mayor razón A/C, mayor porosidad, lo que vuelve la matriz de la pasta de cemento más débil y entonces el hormigón menos resistente. Al revés, a menor razón A/C (o sea, a mayor cantidad de cemento), el hormigón presenta una resistencia mayor, siendo directamente relacionada con la calidad y la cantidad de cemento presente. Luego, la relación entre la cantidad de árido y la de cemento también es un factor influyente en la resistencia del hormigón, aunque de menor importancia que la razón A/C. Se estudió que a razón A/C constante, para una mayor razón árido/cemento se nota una resistencia mayor; eso se puede explicar por parte por la absorción de los áridos, quitando agua libre a la mezcla y así bajando efectivamente la razón A/C<sup>18</sup>.

Finalmente, también se puede notar que el sistema de mezclado puede tener importancia en el buen desarrollo de la resistencia; este punto se desarrollará más en detalle en la sección 2.3 del presente informe.

### **2.4.3 Durabilidad e impermeabilidad**

La durabilidad de un hormigón se define como su capacidad de resistir, en estado endurecido, la acción del Medio Ambiente, ya sea de agentes meteorológicos, ataques químicos, abrasión u otras condiciones de servicio.<sup>19</sup>

Las propiedades que caracterizan la durabilidad de un hormigón pueden ser: su resistencia a la abrasión (o desgaste), su impermeabilidad a los ataques químicos (como a los sulfatos o a los cloruros), o su resistencia a ciclos de hielo-deshielo. Dentro de aquellas, la impermeabilidad de un hormigón se define como su capacidad a evitar la penetración de agua bajo presión<sup>20</sup>.

Estas propiedades están directamente relacionadas tanto con su porosidad, permeabilidad y contenido de aire, como con la calidad de los áridos que componen el hormigón y del agua de amasada. Además, los principales componentes del hormigón influyendo en su durabilidad son, en orden decreciente de influencia: los áridos, las fases sólidas en la pasta de cemento hidratada y el agua de amasada.

---

<sup>18</sup> *LATORRE OYANADEL Verónica Valeria. Influencia del Contenido de Adiciones Puzolánicas y del Proceso de Elaboración de la Mezcla en la Resistencia Mecánica del Hormigón. Tesis. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009*

<sup>19</sup> *Comité ACI 116. Terminología del Cemento y del Hormigón. Estados-Unidos*

<sup>20</sup> *NCh2262 Of.1997 Hormigón y Mortero – Método de ensayo - Determinación de la impermeabilidad al agua – Método de la penetración de agua bajo presión.*

Primero, los áridos granulares, formando el esqueleto inerte del hormigón, dan rigidez, para resistir las acciones exteriores (clima, abrasión, desgaste), y estabilidad.

Segundo, los cristales de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que se forman en la pasta de cemento hidratada, desmejoran la durabilidad de esta.

Finalmente, la cantidad y la calidad del agua que se usa para hidratar la pasta de cemento condicionan el desarrollo de la durabilidad del hormigón endurecido. La calidad influye dependiendo del contenido de impurezas que pueden existir en el agua, puesto que puede interferir con el fraguado del cemento, bajar su resistencia, deteriorar su apariencia con manchas o provocar la corrosión de las armaduras.<sup>21</sup> Además, la cantidad de agua puede afectar al desarrollo correcto de la hidratación de las partículas de cemento, lo que lo vuelve más débil y menos impermeable.

De esta forma, y en base al presentado en los párrafos anteriores, la permeabilidad se ve como una de las propiedades más relevante en términos de durabilidad del hormigón, por lo que se la estudiará en hormigón hecho con árido reciclado con respecto al hormigón tradicional.

---

<sup>21</sup> *VIDELA, C. Antecedentes Generales del Hormigón en su Tecnología del Hormigón, Depto Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile*

## **CAPITULO 3 Programa experimental**

### **3.1 Introducción**

Este capítulo presenta el programa experimental que se desarrolló para analizar el comportamiento de hormigones hechos con distintos contenidos de áridos reciclados, cambiando su método de elaboración.

El objetivo de este programa experimental es evaluar la incorporación factible de áridos reciclados a las mezclas de hormigón, optimizándola con un mejoramiento del proceso de fabricación de la mezcla de hormigón (proceso en etapas), y luego comparar las propiedades del hormigón reciclado, fresco y endurecido, con las del hormigón hecho con áridos vírgenes.

De esta forma, las propiedades analizadas durante este trabajo, son el comportamiento mecánico y la impermeabilidad de cada uno de estos hormigones, además de su comportamiento en estado fresco.

### **3.2 Planteamiento de la investigación**

El plan de trabajo a seguir considera una serie de ensayos, tanto de caracterización del comportamiento del hormigón en estado fresco como de su resistencia en estado endurecido.

Como estudio previo, se define una dosificación tentativa de los hormigones que se van a fabricar, con una estimación de las cantidades de los materiales a utilizar (árido reciclado, árido natural, cemento, etc.).

Luego, el primer paso consistirá en la caracterización de los distintos materiales usados: áridos reciclados, árido natural, cemento. Para los áridos reciclados, se usará la norma chilena NCh163 Of.1979 de Requisitos Generales para Áridos de Morteros y Hormigones.

La caracterización del árido reciclado permitirá un mejor conocimiento de sus propiedades intrínsecas, como su velocidad de absorción, lo que dará lugar a un ajuste de las dosificaciones anteriormente definidas.

En el segundo paso se fabricarán las coladas de pruebas de cada serie de hormigón, ajustando el agua para lograr la trabajabilidad deseada.

Luego, los hormigones se fabricarán según las dosificaciones especificadas, mediante dos procesos: el convencional y en etapas.

El tercer paso consistirá en ensayar los hormigones previamente fabricados en estado fresco, según, entre otras, las normas NCh1019 Of.1974 – Docilidad, NCh1564 Of.1979 – Densidad Aparente y Rendimiento, y NCh2184 Of.1992 - Contenido de Aire.

En un cuarto y último paso, se ensayarán las probetas cúbicas hechas con los distintos hormigones a 7 y 28 días, según la norma chilena NCh1037 Of.1977 – Ensayo de Resistencia a Compresión. También se ensayarán probetas cúbicas para determinar su impermeabilidad y su absorción de agua, según la norma chilena NCh2262 Of.1997 – Hormigón y Mortero – Métodos de ensayo – Determinación de la impermeabilidad al agua – Método de la penetración de agua bajo presión.

### **3.3 Definición de las variables**

Se ensayarán 6 series de hormigones, con distintos porcentajes de árido reciclado, una razón agua/cemento y distintos modos de fabricación.

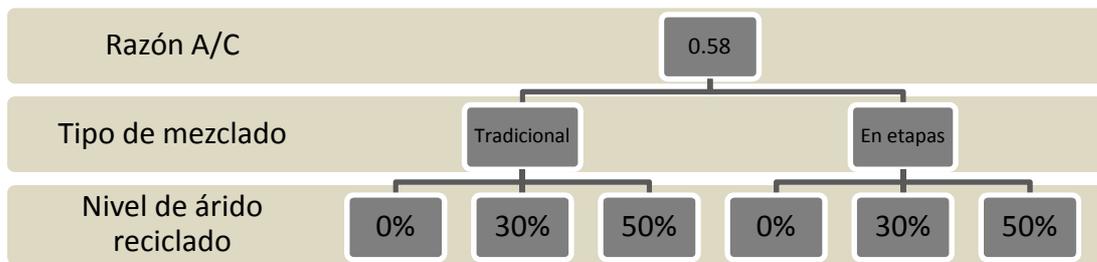
Los tipos de hormigón a ser fabricados y ensayados serán 3 :

- Hormigón con 0% de árido reciclado (H30) – patrón
- Hormigón con 30% de árido reciclado (H30)
- Hormigón con 50% de árido reciclado (H30)

Por razones de consistencia y practicidad, se considerará una razón constante de Agua/Cemento:  $A/C=0.58$ .

Luego, cada uno de los 3 tipos de material antes mencionados se fabricará mediante la aplicación de dos procesos distintos, uno tradicional y uno en etapas.

Así, en total se trabajará con 6 series de hormigones que se van a ensayar, resumidas en la siguiente figura:



**Figura 7 Series de hormigones de prueba**

Cada serie se denomina según la siguiente tabla:

**Tabla 1 Denominación de las series**

Serie	Razón A/C	Mezclado		% RAC		
	0.58	Normal	En etapas	0	30	50
RA 0%-NMA	x	x		x		
RA 30%-NMA	x	x			x	
RA 50%-NMA	x	x				x
RA 0%-TSMA	x		x	x		
RA 30%-TSMA	x		x		x	
RA 50%-TSMA	x		x			x

### 3.4 Obtención del material reciclado

Para obtener los áridos reciclados, el primer paso es encontrar una fuente de hormigón terminado y con suficiente endurecimiento; por eso, se consideró las probetas de hormigón fabricadas por el IDIEM dentro de su actividad, que ya han sido ensayadas y desechadas.

Para asegurar una facilidad de proceso y una calidad de hormigón dada, se recolectaron sólo probetas cúbicas de hormigón del tipo H30, las cuales fueron depositadas en un contenedor separado del resto de los desechos, el cual fue trasladado posteriormente a la planta de áridos de la empresa Pétreos Quilín para el chancado del material. Para asegurar que el proceso de chancado fuera lo más eficiente posible se llevó la siguiente cantidad de material a la planta ubicada en Peñalolén: 7 camiones de 12 m<sup>3</sup>, lo que representa aproximadamente 80 m<sup>3</sup> de cubos.

Luego, los cubos fueron procesados en una planta chancadora de la empresa de Pétreos Quilín para obtener el material necesario. La planta consiste en dos chancadores: el primario es un chancador de mandíbulas, que procesa el material bruto para llegar a un material un poco más fino. Luego, el material pasa por un tamiz de malla ½" (o 12.5 mm); la fracción que

pasa se dirige al acopio, mientras la fracción de material que no pasa se manda al chancador secundario, de cono, para ser reprocesada. Así, se utilizó un sistema de bucle para asegurar que todo el material que llega al acopio pase por la malla 1/2”.

A continuación se muestran imágenes de este proceso:



**Figura 8 Procesamiento en planta de los cubos reciclados**

Una vez finalizado el procesamiento, el material obtenido fue enviado nuevamente al IDIEM para realizar un análisis previo de sus características principales.

Ahora, dado que para efectos de este Trabajo de Título sólo se utilizará la parte más gruesa del árido reciclado, se separó el polvo (material bajo malla #30) del resto del material mediante tamizado (directamente en IDIEM), ya que las cantidades necesarias no son muy importantes.

El proceso total de obtención del árido reciclado se resume en imágenes a continuación:



**Figura 9 Proceso total de obtención del árido reciclado**

# **CAPITULO 4 Desarrollo experimental**

## **4.1 Introducción**

Este trabajo de título se ha enfocado en la comparación de los resultados de ensayos tanto en hormigón fresco como endurecido de hormigones con distintos niveles de árido reciclado. La comparación se llevó a cabo en base a propiedades básicas de resistencia mecánica y de durabilidad del hormigón.

En este capítulo se detallan los materiales y los procedimientos utilizados a lo largo de este estudio experimental.

## **4.2 Caracterización de los materiales**

### **4.2.1 Áridos reciclados**

Como material no conocido, se hizo una caracterización completa del producto bruto obtenido después del chancado de los cubos de hormigón. Se tuvo que tener cuidado al efectuar ciertas rutinas de ensayos, por ejemplo en el secado del material, ya que es bastante frágil y desmenuzable y el secado tradicional por roce lo habría dañado; por eso se usó en este caso un secado por corriente de aire.

Se hicieron los siguientes ensayos para caracterizar lo mejor posible este nuevo material:

- Determinación de la densidad aparente
- Determinación de la granulometría
- Determinación de la densidad real y neta
- Determinación de la absorción
- Determinación del fino bajo 0,08 mm
- Determinación de partículas desmenuzables

Los resultados se encuentran a continuación:

**Tabla 2 Granulometría del árido reciclado**

ASTM	mm	Árido reciclado
1/2"	12,5	100
3/8"	10	92
4	5	57
8	2,5	32
16	1,25	18
30	0,63	10
50	0,315	6
100	0,16	4

**Tabla 3 Propiedades del árido reciclado**

<b>Finos bajo malla 0,080 mm (%)</b>		2,3
<b>Densidad real seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	Fracción > 5 mm (gruesa)	2,432
<b>Densidad real SSS (kg/m<sup>3</sup>)</b>		2,551
<b>Densidad neta (kg/m<sup>3</sup>)</b>		2,76
<b>Absorción (%)</b>		4,89
<b>Densidad real seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	Fracción < 5 mm (fina)	2,156
<b>Densidad real SSS (kg/m<sup>3</sup>)</b>		2,363
<b>Densidad neta (kg/m<sup>3</sup>)</b>		2,718
<b>Absorción (%)</b>		9,59
<b>Partículas desmenuzables (%)</b>		1,9
<b>Fracción de ensayo (mm)</b>		10 -1,25
<b>Sal utilizada para el ensayo</b>		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

En la Figura 10 se muestra el acopio de material reciclado grueso obtenido:



**Figura 10** Árido reciclado utilizado después de tamizado

#### 4.2.2 Áridos naturales

Los áridos naturales utilizados son los usualmente empleados por el IDIEM; tienen la siguiente granulometría:

**Tabla 4** *Granulometría del árido natural*

<b>ASTM</b>	<b>mm</b>	<b>Gravilla Maipo</b>	<b>Arena Maipo</b>
<b>1"</b>	<b>25</b>	100	
<b>3/4"</b>	<b>20</b>	99	
<b>1/2"</b>	<b>12,5</b>	54	
<b>3/8"</b>	<b>10</b>	20	100
<b>4</b>	<b>5</b>	1	97
<b>8</b>	<b>2,5</b>		74
<b>16</b>	<b>1,25</b>		53
<b>30</b>	<b>0,63</b>		37
<b>50</b>	<b>0,315</b>		21
<b>100</b>	<b>0,16</b>		6

#### 4.2.3 Áridos totales

Para que la granulometría de la grava natural usada se acerque más a la de la gravilla reciclada obtenida, se corta la grava dejando solamente el material bajo malla # 1/2", como también se cortó la gravilla reciclada por bajo malla #30; eso da la siguiente granulometría final del árido total:

**Tabla 5 Granulometría corregida de los áridos**

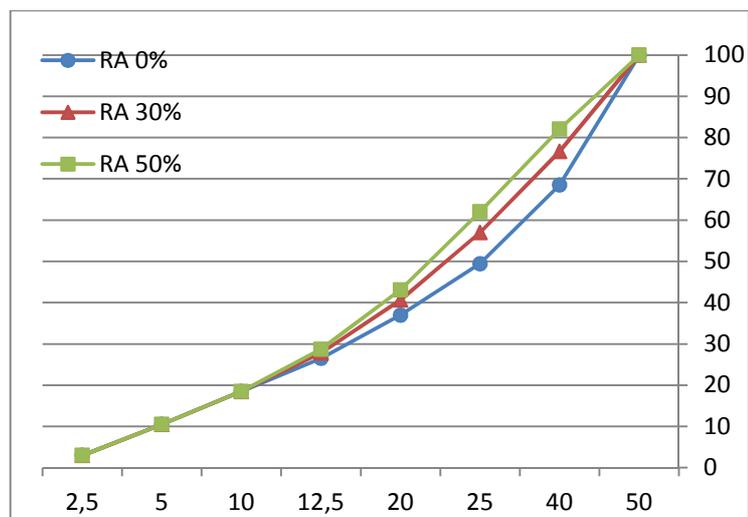
ASTM	mm	Árido reciclado corregida	Gravilla Maipo corregida	Arena Maipo
1/2"	12,5	100	100	
3/8"	10	91	37	100
4	5	52	2	97
8	2,5	24		74
16	1,25	9		53
30	0,63	0		37
50	0,315			21
100	0,16			6

Luego, la granulometría del árido total de cada mezcla de hormigón será la indicada en la Tabla 6, considerando 50% de árido grueso y 50% de árido fino para cada una:

**Tabla 6 Granulometría del árido total**

RA 0%			RA 30%			RA 50%		
ASTM	mm	Granulometría	ASTM	mm	Granulometría	ASTM	mm	Granulometría
1/2"	12,5	100	1/2"	12,5	100	1/2"	12,5	100
3/8"	10	69	3/8"	10	77	3/8"	10	82
4	5	49	4	5	57	4	5	62
8	2,5	37	8	2,5	41	8	2,5	43
16	1,25	27	16	1,25	28	16	1,25	29
30	0,63	19	30	0,63	19	30	0,63	19
50	0,315	11	50	0,315	11	50	0,315	11
100	0,16	3	100	0,16	3	100	0,16	3

Los valores antes presentados se pueden graficar como se muestra a continuación:



**Figura 11 Representación gráfica de la granulometría del árido total**

#### 4.2.4 Cemento

El cemento usado es un cemento comercial denominado Melón Extra, que corresponde a la clasificación Portland Puzolánico Alta Resistencia de la norma NCh148, con las siguientes características:

**Tabla 7 Características del cemento Melón Extra**

<b>Fraguado Inicial [minutos]</b>	139
<b>Fraguado Final [minutos]</b>	198
<b>Superficie específica Blaine [cm<sup>2</sup>/g]</b>	4975
<b>Peso específico</b>	2.99

<b>Pérdida por calcinación [%]</b>	1.83
<b>Residuo insoluble [%]</b>	11.3
<b>Contenido de SO<sub>3</sub> [%]</b>	3.07

<b>Resistencia a compresión [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>3 días</b>	362
	<b>7 días</b>	419
	<b>28 días</b>	517
<b>Resistencia a flexo tracción [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>3 días</b>	60
	<b>7 días</b>	68
	<b>28 días</b>	80

#### 4.2.5 Agua

El agua ocupada en los hormigones fue agua potable de la ciudad de Santiago a temperatura de 20 ± 2 °C.

### 4.3 Dosificaciones

#### 4.3.1 Dosificación teórica

Para partir se propone una dosificación previa al fabricar los hormigones, basada en los datos típicos de un hormigón tradicional, de calidad estructural, y en los datos de ensayos de caracterización del árido reciclado. Al mismo tiempo, se propone una cubicación de las

cantidades de cada material requerido para las coladas de hormigones de prueba, de 50L cada una aproximadamente. Esta dosificación y cubicación se muestra a continuación:

**Tabla 8 Dosificación teórica de hormigón patrón con 0% de árido reciclado**

DOSIFICACION	PATRON	RA 0	Razón A/C	
<b>A/C=0,45 - RA0%</b>				0,45
	Peso [kg/m3]	Volumen [L]	Peso propio	<b>Peso por 50L seco [kg]</b>
Cemento	380	131	2,9	<b>19</b>
Grava natural	902	334	2,7	<b>45</b>
Grava reciclada	0	0	2,5	<b>0</b>
Arena	902	334	2,7	<b>45</b>
Agua	171	260	1	<b>9</b>
Aire		30		
TOTAL	2355	1089		

**Tabla 9 Dosificación de hormigón teórica con 30% de árido reciclado**

DOSIFICACION	RA 0,3		Razón A/C	
<b>A/C=0,45 - RA30%</b>				0,45
	Peso [kg/m3]	Volumen [L]	Peso propio	<b>Peso por 50L seco [kg]</b>
Cemento	380	131	2,9	<b>19</b>
Grava natural	631	234	2,7	<b>32</b>
Grava reciclada	271	108	2,5	<b>14</b>
Arena	902	334	2,7	<b>45</b>
Agua	171	260	1	<b>9</b>
Aire		30		
TOTAL	2355	1097		

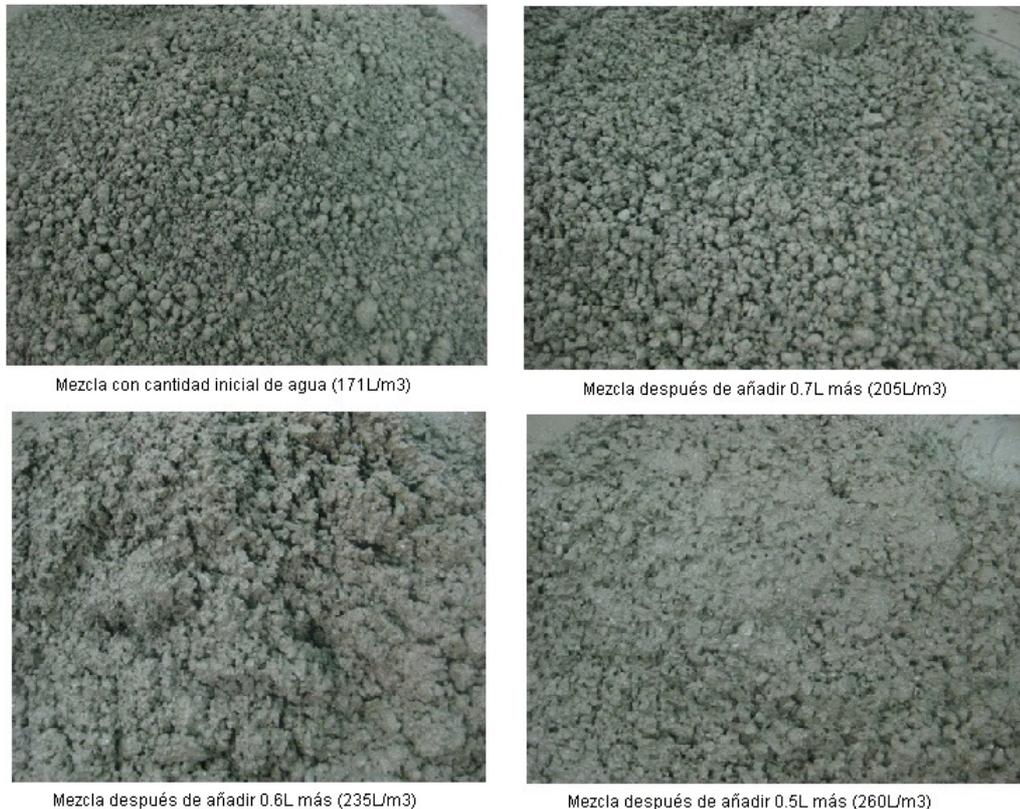
**Tabla 10 Dosificación teórica de hormigón con 50% de árido reciclado**

DOSIFICACION	RA 0,5		Razón A/C	
<b>A/C=0,45 - RA50%</b>				0,45
	Peso [kg/m3]	Volumen [L]	Peso propio	<b>Peso por 50L seco [kg]</b>
Cemento	380	131	2,9	<b>19</b>
Grava natural	451	167	2,7	<b>23</b>
Grava reciclada	451	180	2,5	<b>23</b>
Arena	902	334	2,7	<b>45</b>
Agua	171	260	1	<b>9</b>
Aire		30		
TOTAL	2355	1102		

Con RA significando "Árido Reciclado" (*Recycled Aggregate*).

Luego, ya que es notorio que el árido reciclado tiene una alta tasa de absorción de agua y propiedades poco conocidas, se decide hacer un hormigón de prueba de unos 20L, jugando con la cantidad de agua necesaria para llegar a una trabajabilidad aceptable.

Se muestra el proceso iterativo que se utilizó al hacer el ajuste del agua al hormigón de prueba (20L), aumentando en pasos sucesivos la cantidad de agua:



**Figura 12 Aspectos de los distintos pasos al hacer el hormigón de prueba**

Se señala que, al incrementar la dosis de agua, se pasa de un hormigón con un aspecto segregable y de consistencia seca a un aspecto pastoso y conveniente para un hormigón trabajable en obra.

#### **4.3.2 Dosificación final**

Luego de hacer la colada de prueba, se ajustó la dosificación inicial para llegar a un hormigón con la trabajabilidad deseada y una razón A/C compatible con la resistencia propuesta (hormigón estructural); este proceso es necesario si se tiene en cuenta que se conoce la alta demanda de agua de los áridos reciclados y se desconoce su comportamiento. La dosificación final se muestra a continuación:

**Tabla 11 Dosificación final de los hormigones**

DOSIFICACION	PATRON RA 0		Razón A/C	
<b>A/C=0,58 - RA0%</b>				0,58
	Peso [kg/m3]	Volumen [L]	Peso propio	<b>Peso por 50L seco [kg]</b>
Cemento	448,3	154,6	2,9	<b>22,4</b>
Grava natural (SSS)	749,8	277,7	2,7	<b>37,5</b>
Grava reciclada (SSS)	0,0	0,0	2,5	<b>0,0</b>
Arena (SSS)	749,8	277,7	2,7	<b>37,5</b>
Agua libre	260,0	260,0	1	<b>13,0</b>
Aire		30,0		
TOTAL	2208	1000		

DOSIFICACION	RA 0,3		Razón A/C	
<b>A/C=0,58 - RA30%</b>				0,58
	Peso [kg/m3]	Volumen [L]	Peso propio	<b>Peso por 50L seco [kg]</b>
Cemento	448,3	154,6	2,9	<b>22,4</b>
Grava natural (SSS)	524,9	194,4	2,7	<b>26,2</b>
Grava reciclada (SSS)	224,9	90,0	2,5	<b>11,2</b>
Arena (SSS)	749,8	277,7	2,7	<b>37,5</b>
Agua libre	260,0	260,0	1	<b>13,0</b>
Aire		30,0		
TOTAL	2208	1007		

DOSIFICACION	RA 0,5		Razón A/C	
<b>A/C=0,58 - RA50%</b>				0,58
	Peso [kg/m3]	Volumen [L]	Peso propio	<b>Peso por 50L seco [kg]</b>
Cemento	448,3	154,6	2,9	<b>22,4</b>
Grava natural (SSS)	374,9	138,9	2,7	<b>18,7</b>
Grava reciclada (SSS)	374,9	150,0	2,5	<b>18,7</b>
Arena (SSS)	749,8	277,7	2,7	<b>37,5</b>
Agua libre	260,0	260,0	1	<b>13,0</b>
Aire		30,0		
TOTAL	2208	1011		

De lo anterior, es posible notar que hubo un aumento significativo en la cantidad de agua necesaria para obtener una trabajabilidad adecuada sin incorporación de aditivos, lo que involucró aumentar la razón A/C del valor inicial de 0.45 a 0.58, para permitir la obtención de hormigones de características comparables entre sí.

La etapa final en la dosificación consiste en corregir esta última por la humedad presente en los áridos, ya que estos se encuentran en estado saturado al momento de realizar la mezcla:

**Tabla 12 Dosificación corregida por humedad de la serie de mezclado normal**

SERIE  
MEZCLADO NORMAL

DOSIFICACION	A/C=0,58 - RA0%		
	Absorción [%]	Humedad [%]	Peso por 50 L (húmedo) [kg]
Cemento			22,41
Grava natural (húmedo)	0,40	1,00	37,87
Grava reciclada (húmedo)	7,03	9,90	0,00
Arena (húmedo)	1,40	2,50	38,43
Agua amasado			11,69

DOSIFICACION	A/C=0,58 - RA30%		
	Absorción [%]	Humedad [%]	Peso por 50 L (húmedo) [kg]
Cemento			22,41
Grava natural (húmedo)	0,40	1,00	26,51
Grava reciclada (húmedo)	7,03	9,90	12,36
Arena (húmedo)	1,40	2,50	38,43
Agua amasado			10,69

DOSIFICACION	A/C=0,58 - RA50%		
	Absorción [%]	Humedad [%]	Peso por 50 L (húmedo) [kg]
Cemento			22,41
Grava natural (húmedo)	0,40	1,00	18,93
Grava reciclada (húmedo)	7,03	9,90	20,60
Arena (húmedo)	1,40	2,50	38,43
Agua amasado			10,02

DOSIFICACION	A/C=0,58 - RA50%		
	Absorción [%]	Humedad [%]	Peso por 50 L (húmedo) [kg]
Cemento			22,41
Grava natural (húmedo)	0,40	1,00	18,93
Grava reciclada (húmedo)	7,03	9,90	20,60
Arena (húmedo)	1,40	2,50	38,43
Agua amasado			10,02

**Tabla 13 Dosificación corregida por humedad de la serie de mezclado en etapas**

SERIE  
MEZCLADO EN ETAPAS

DOSIFICACION	A/C=0,58 - RA0%		
	Absorción [%]	Humedad [%]	Peso por 50 L (húmedo) [kg]
Cemento			22,41
Grava natural (húmedo)	0,40	2,10	38,28
Grava reciclada (húmedo)	7,03	8,00	0,00
Arena (húmedo)	1,40	2,10	38,28
Agua amasado			11,43

DOSIFICACION	A/C=0,58 - RA30%		
	Absorción [%]	Humedad [%]	Peso por 50 L (húmedo) [kg]
Cemento			22,41
Grava natural (húmedo)	0,40	2,10	26,79
Grava reciclada (húmedo)	7,03	8,00	12,15
Arena (húmedo)	1,40	2,10	38,28
Agua amasado			10,76

DOSIFICACION	A/C=0,58 - RA50%		
	Absorción [%]	Humedad [%]	Peso por 50 L (húmedo) [kg]
Cemento			22,41
Grava natural (húmedo)	0,40	2,10	19,14
Grava reciclada (húmedo)	7,03	8,00	20,25
Arena (húmedo)	1,40	2,10	38,28
Agua amasado			10,32

#### 4.4 Elaboración de hormigones

Los hormigones se elaboraron en el laboratorio de hormigones del IDIEM.

Para fabricarlos se utilizó una betonera eléctrica de eje basculante, de capacidad máxima de 150L de hormigón, que rota a una velocidad aproximada de 20 rev/min.



**Figura 13 Betonera**

#### 4.4.1 Mezclado tradicional

Se fabricaron 3 hormigones con mezclado tradicional, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

- Pesaje del cemento, de los áridos reciclados, de la gravilla natural y de la arena natural, así como también del agua utilizada, según lo especificado en las dosificaciones anteriores.



**Figura 14 Materiales pesados y listos para fabricar los hormigones**

- Luego, se agrega la gravilla, la arena y el cemento a la betonera, utilizando un ángulo de  $60^\circ$  respecto del eje vertical.
- Mezclado de 30 segundos aproximadamente.
- Se agrega alrededor del 75% del agua y se mezcla por otros 30 segundos.
- Según la consistencia que se observe en el hormigón, se agrega o no el resto del agua, hasta llegar a una trabajabilidad adecuada.
- Vaciado del hormigón de la betonera sobre una carretilla.

#### 4.4.2 Mezclado en etapas

Se fabricaron otros 3 tipos de hormigón mediante un proceso de mezclado en etapas, el cual se explica a continuación:

- Pesaje del cemento, de los áridos reciclados, de la gravilla natural y de la arena natural, así como también del agua utilizada, según lo especificado en las dosificaciones anteriores.
- Se pone primero el cemento y el árido reciclado pre saturado, y se mezclan durante 60 segundos



**Figura 15 Mezcla del cemento y del árido reciclado**

- Luego se agrega la mitad del agua necesaria, y se revuelve durante otros 60 segundos.



**Figura 16 Mezcla cemento + árido reciclado + mitad del agua**

- Se agrega finalmente la gravilla y la arena natural, y el resto del agua (hasta llegar a una consistencia deseada), y se mezcla durante 2 minutos.
- Se vacía el contenido de la betonera a una carretilla.

#### **4.4.3 Fabricación de probetas cúbicas**

Se utilizaron moldes cúbicos de 15 cm de arista, en resina, usualmente utilizados para ensayar los hormigones a compresión y a impermeabilidad.



***Figura 17 Moldes***

Los moldes se llenaron y se compactaron en una mesa vibratoria, de acuerdo a la norma NCh 1017 Of.75 de Confección y Curado de probetas para ensayos de compresión.



***Figura 18 Vibración de las probetas***

El curado de esas probetas se hizo según la misma norma NCh1017 Of.75: bajo agua tranquila, saturada de cal, entre 17°C y 23°C.



**Figura 19 Piscina de curado de probetas**

## **4.5 Programa de ensayos**

En este capítulo se describen los ensayos tanto en hormigón fresco como endurecido.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio Melón del IDIEM.

### **4.5.1 Ensayos en hormigón fresco**

- Asentamiento y mantención de cono

La docilidad de la pasta de hormigón se determina mediante la medida del asentamiento de cono de Abrams. Este ensayo consiste en medir la diferencia de altura entre el cono de metal y el de hormigón luego de derrumbarse; así se puede apreciar la trabajabilidad y la consistencia de dicho hormigón.

También se puede medir el asentamiento de cono del hormigón luego de cierto tiempo, para comprobar la evolución de la trabajabilidad en el tiempo. En el caso de este Trabajo de Titulo, se midió la mantención de cono a 1 hora.

El ensayo se realiza según la norma NCh1019 Of.74 “Construcción - Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento del cono de Abrams”.



**Figura 20 Medida del asentamiento de cono de Abrams**

- Densidad

La medida de la densidad incluye el volumen total de la muestra de hormigón, lo que equivale al volumen de hormigón más el volumen de aire contenido adentro.

Así, se entrega un peso del hormigón en un volumen dado.

Este ensayo se hizo de acuerdo al procedimiento indicado en la norma NCh1564 Of.79 Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco.



**Figura 21 Aparato de medida de densidad**

- Contenido de aire

Para medir el contenido de aire del hormigón fresco se mide el cambio de volumen del hormigón sometido a un cambio de presión.

Para este ensayo se procedió de acuerdo a lo indicado en la norma NCh1564 Of.79 Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco.



**Figura 22 Aparato de medida del contenido de aire<sup>22</sup>**

#### 4.5.2 Ensayo de compresión

Los ensayos de compresión de las probetas cúbicas de distintas edades se llevaron a cabo según la norma NCh1037 Of.77: Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.



**Figura 23 Equipo de ensayo de compresión**

<sup>22</sup> LATORRE OYANADEL Verónica Valeria. *Influencia del Contenido de Adiciones Puzolánicas y del Proceso de Elaboración de la Mezcla en la Resistencia Mecánica del Hormigón*. Tesis. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009

El equipo de ensayo de resistencia a compresión de probetas cúbicas utilizado fue una prensa Toni Technik.

Se ensayaron 2 probetas de cada hormigón a 4, 7 y 28 días.

#### 4.5.3 Ensayo de impermeabilidad

Se realizó de acuerdo a la norma NCh2262.Of1997: Hormigón y mortero - Métodos de ensayo - Determinación de la impermeabilidad al agua - Método de la penetración de agua bajo presión.

Primero se deja las probetas cúbicas 4 días bajo presión de agua aplicada sobre una de las caras de la probeta, aumentando gradualmente esta presión. Esta etapa se muestra en la siguiente fotografía:



**Figura 24** Aparato de presión de agua

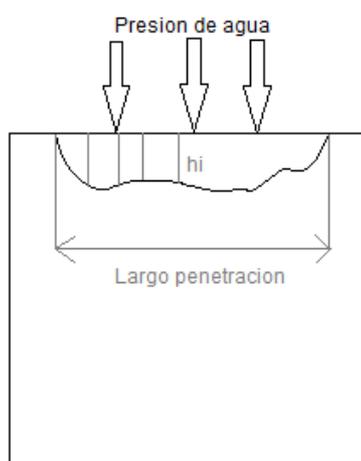
Las probetas se sellan en la superficie no expuesta de la cara sometida a presión de agua, para evitar que se escurra agua por los lados del cubo, lo que falsearía los resultados.

Finalmente, después de 4 días bajo presión, se parten por hendimiento diametral y se mide la profundidad de penetración del agua en la probeta. Así se puede determinar la capacidad de la probeta a dejar filtrar el agua o no.



**Figura 25 Marcación del nivel de penetración de agua de la probeta en superficie de fractura**

El esquema a continuación explica el método de cálculo:



**Figura 26 Esquema del cálculo de la penetración de agua**

Con el promedio igual a  $\frac{\sum hi}{10}$ .

Se ensayaron 3 probetas de cada tipo de hormigón.

## CAPITULO 5 Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados de los distintos ensayos realizados tanto en hormigón fresco como, después, endurecido, para las distintas propiedades previamente definidas.

Visualmente, el hormigón hecho con el mezclado en etapas se veía más segregado, y se observó que material fino y cemento se adhirieron a las paredes de la betonera al añadir el agua. Además, en este caso, los hormigones patrón se encontraron más líquidos que los hormigones con árido reciclado.

Luego, cabe notar que al hacer los hormigones, se ajustó la cantidad de agua con respecto a la calculada. De esta forma, las razones A/C de trabajo en la experimentación fueron las siguientes:

**Tabla 14 Razones A/C efectivas de cada serie de hormigón**

<b>Serie</b>	<b>NMA-RA0%</b>	<b>NMA-RA30%</b>	<b>NMA-RA50%</b>	<b>TSMA-RA0%</b>	<b>TSMA-RA30%</b>	<b>TSMA-RA50%</b>
<b>Razón A/C</b>	0,48	0,49	0,55	0,48	0,49	0,55

NMA: mezclado normal (*Normal Mixing Approach*)

TSMA: mezclado en etapas (*Two-Stage Mixing Approach*)

RA: árido reciclado (*Recycled Aggregate*)

### 5.1 Propiedades del hormigón fresco

La siguiente tabla entrega los resultados de los ensayos de asentamiento y mantención del cono de Abrams, de densidad y de contenido de aire hechos con las 6 series de hormigones:

**Tabla 15 Resultados de ensayos en hormigón fresco**

<b>Serie</b>	<b>Asentamiento de cono [cm]</b>	<b>Mantención de cono a 1h [cm]</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Contenido de aire [%]</b>
<b>NMA-RA0</b>	13		2354	1,2
<b>NMA-RA30</b>	8,5	6,5	2328	1,7
<b>NMA-RA50</b>	9	6,5	2298	1,9
<b>TSMA-RA0</b>				
	12,5		2345	1,3
<b>TSMA-RA30</b>	6	3,5	2315	1,8
<b>TSMA-RA50</b>	8,5	6,5	2278	2

## 5.2 Propiedades del hormigón endurecido

### 5.2.1 Ensayo de compresión a 4, 7 y 28 días

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión en probetas cúbicas a 4, 7 y 28 días respectivamente.

**Tabla 16 Resultados de ensayos de compresión a 4, 7 y 28 días**

Serie	Resistencia a compresión [MPa]			Resistencia a compresión [kgf/cm <sup>2</sup> ]		
	4 días	7 días	28 días	4 días	7 días	28 días
<b>NMA-RA0</b>	42,5	44,6	56,9	433	455	580
	41,2	46,8	55,8	420	477	569
<b>NMA-RA30</b>	43,7	48,0	56,0	446	489	571
	43,3	48,3	57,3	442	493	584
<b>NMA-RA50</b>	41,7	44,5	52,8	425	454	538
	40,8	44,9	54,4	416	458	555
<b>TSMA-RA0</b>	42,6	46,8	57,6	434	477	587
	43,4	48,1	57,2	443	490	583
<b>TSMA-RA30</b>	39,0	44,6	53,2	398	455	542
	41,0	45,5	54,2	418	464	553
<b>TSMA-RA50</b>	36,4	39,1	51,5	371	399	525
	37,2	40,3	50,6	379	411	516

Los valores marcados en gris, de resistencia a compresión de las probetas patrones del mezclado normal a edades, no siguen la tendencia global de los otros resultados; de hecho, deberían ser lógicamente iguales o parecidas a los valores de resistencia a compresión de las probetas con 0% de árido reciclado de mezclado en etapas, ya que estas dos series se hicieron con la misma dosificación y el mismo método de fabricación. Eso se puede explicar primero por el hecho de que el hormigón patrón, es decir sin árido reciclado, fabricado de manera tradicional, resultó de mayor fluidez que los demás hormigones, puesto que al ser el primero en ser fabricado se ajustó el agua al fabricarlo. Luego, al ser más líquido, es lógico que tenga una resistencia a compresión menor que los otros hormigones, cualquier sea el proceso de mezclado.

Entonces, se puede suponer que si hubiera sido ajustado adecuadamente, este hormigón hubiera seguido la tendencia lógica que consiste en que la resistencia a compresión baja con el contenido de áridos reciclados. Esta tendencia se observa muy claramente en el caso de la serie de hormigones mezclados en etapas, y también se desprende en el caso de los hormigones con 30% y 50% de árido reciclado mezclados normalmente.

Por lo tanto, en el análisis de resultados, se recluirán aquellos valores y en vez de ellos se considerarán los valores de resistencia a compresión de la serie de mezclado en etapas con 0% de árido reciclado.

## 5.2.2 Ensayo de impermeabilidad

Se presentan en la siguiente tabla los resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión para determinar la impermeabilidad de los hormigones, según la norma NCh2262 Of.97:

**Tabla 17 Valores del ensayo de penetración de agua bajo presión**

Serie	Penetración Promedio [mm]	Penetración Máxima [mm]	Largo Penetración [mm]	Penetración de agua [mm]	Promedio serie [mm]
<b>NMA-RA0</b>	10,2	19	102	6,9	<b>5,3</b>
	7,7	15	83	4,3	
	8,1	17	86	4,6	
<b>NMA-RA30</b>	9,5	15	80	5,1	<b>5,1</b>
	10,4	19	88	6,1	
	7,6	14	80	4,1	
<b>NMA-RA50</b>	15,3	41	95	9,7	<b>8,1</b>
	11,8	17	85	6,7	
	11,8	20	102	8,0	
<b>TSMA-RA0</b>	14,5	24	117	11,3	<b>9,8</b>
	14,5	30	99	9,6	
	14,4	22	90	8,6	
<b>TSMA-RA30</b>	9,4	18	108	6,8	<b>7,8</b>
	16,1	29	90	9,7	
	11,7	18	90	7,0	
<b>TSMA-RA50</b>	11,1	17	81	6,0	<b>6,3</b>
	7,9	12	63	3,3	
	10,6	16	135	9,5	

## **CAPITULO 6 Análisis de resultados**

A continuación se analizan los resultados obtenidos en los distintos ensayos que se realizaron para este Trabajo de Título, tanto en hormigón fresco como endurecido.

Como primera observación, pareciera relevante hacer notar que todos los resultados se consideraron consistentes, ya que para cada una de las dos probetas que se hicieron para cada uno de los hormigones estudiados no se observaron diferencias significativas.

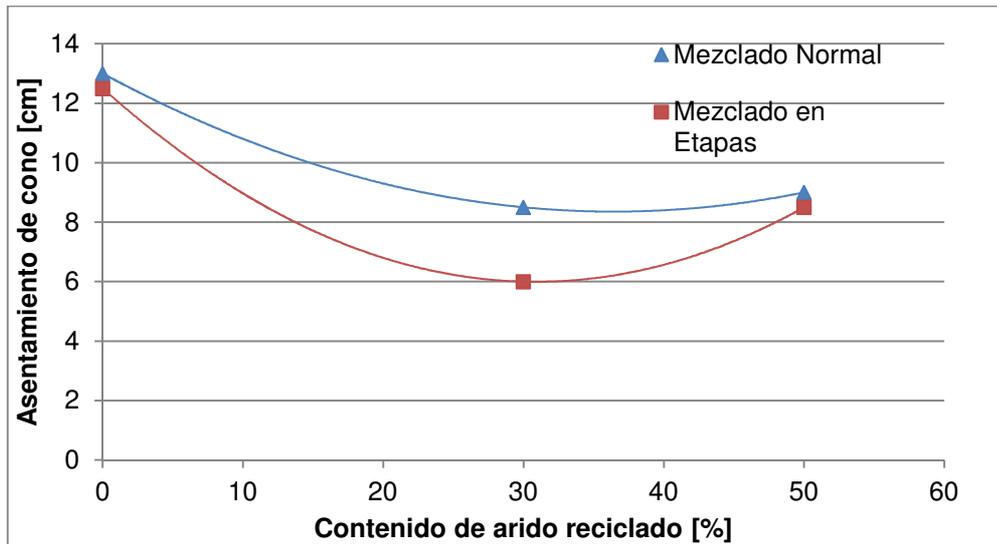
### **6.1 Propiedades del hormigón fresco**

Visualmente, se pudo apreciar que los hormigones hechos con el mezclado en etapas resultaron más segregables que los hormigones fabricados con el método tradicional; eso se puede explicar por la formación de aglutinamientos de cemento adherido alrededor de las partículas de árido reciclado, y también porque se adhirió material fino y cemento a las paredes de la betonera al añadir la primera parte del agua (50%), permitiendo la acumulación de material sin hidratación.

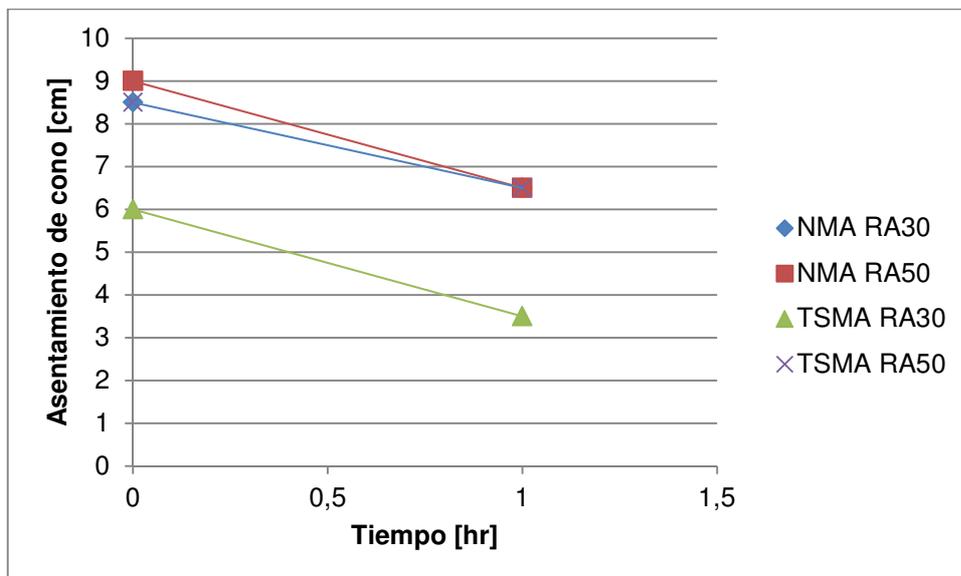
Por otra parte, los hormigones patrón (0% de árido reciclado) resultaron más líquidos que los hormigones con árido reciclado ya que se optó por mantener la razón agua-cemento constante aunque la demanda de agua es más baja para estos hormigones sin árido reciclado.

#### **6.1.1 Asentamiento y mantención de cono**

Se graficaron los resultados de los ensayos de asentamiento y mantención del cono de Abrams para los seis hormigones fabricados, en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado; las curvas correspondientes se muestran en las Figuras 27 y 28:



**Figura 27** Variación del asentamiento de cono en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado



**Figura 28** Mantenimiento del cono de Abrams en el tiempo en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado.

En el gráfico 27, cabe destacar que la serie de hormigones con un 30% de árido reciclado hecho en etapas, tuvo un asentamiento de cono un poco más bajo de lo previsto, lo que se explicaría por el desconocimiento del método de fabricación y del material reciclado, y también por el factor humano al probar este método nuevo.

Además, se desprende que los hormigones con árido reciclado tuvieron un asentamiento de cono más bajo que los hormigones patrones. La trabajabilidad de los hormigones reciclados es, entonces, menor que la de un hormigón normal, lo que posiblemente se debería a la alta

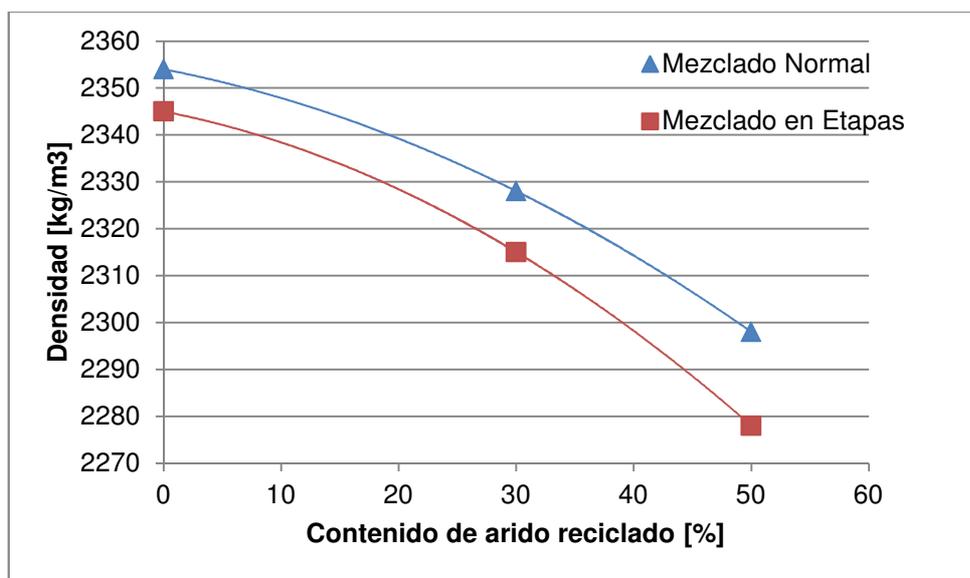
absorción de agua de los áridos reciclados al mezclar todos los materiales y al fabricar los hormigones: mientras más áridos reciclados, más agua presente en la mezcla es absorbida y menos agua queda libre, lo que vuelve la pasta de hormigón menos líquida y por ende, menos trabajable.

Luego, del gráfico 28 se puede observar que todos los hormigones tienden a bajar de cono aproximadamente a la misma tasa, puesto que las 4 rectas presentan aproximadamente la misma pendiente. Así pues, la mantención de cono es aproximadamente igual para cualquier tipo de mezclado; sin embargo, la medida del cono del hormigón hecho en etapas con 30% de árido reciclado (TSMA RA30) está fuera de los rangos considerados, debido a que el hormigón estaba mucho menos fluido al hacerlo (cono 6 cm).

De esta forma, el tipo de método de mezclado no influye en la trabajabilidad del hormigón, pero los hormigones con árido reciclado, a misma razón A/C, tienden a ser más consistentes.

### 6.1.2 Densidad

Se graficaron los valores de densidad que se obtuvieron para cada serie de hormigón en función del porcentaje de árido reciclado y del proceso de mezclado que se utilizó, lo que se presenta en la Figura 29:



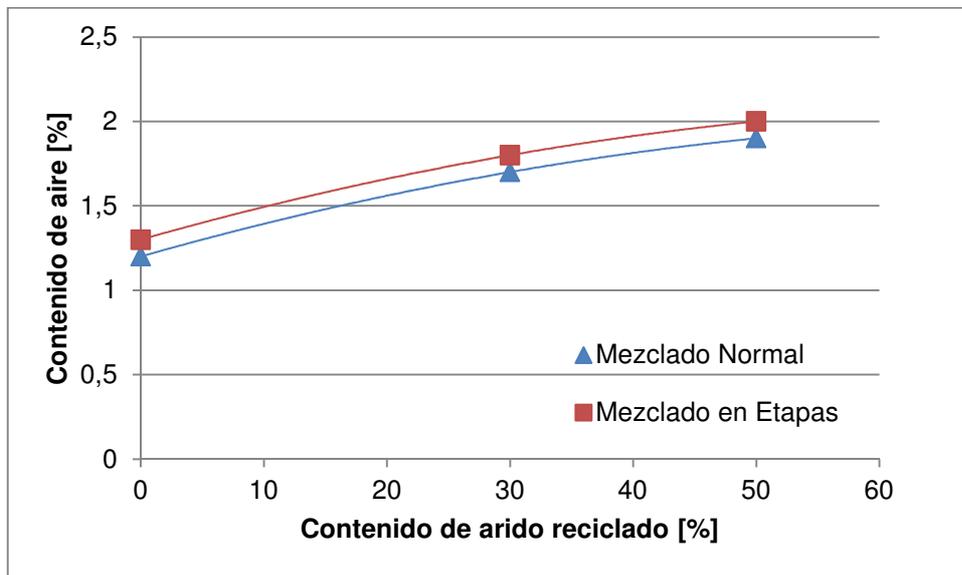
**Figura 29 Variación de la densidad en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado.**

Primero, el gráfico 29 confirma que mientras más árido reciclado más baja la densidad del hormigón fresco, cualquier sea el método de mezclado: en efecto, ambas curvas parecen tener la misma pendiente descendente al aumentar el porcentaje de árido reciclado. Esta tendencia se explica por la densidad menor de los granos de áridos reciclados, lo que repercute directamente en la densidad del hormigón que conforman.

Por otra parte, se destaca otro fenómeno observable en este gráfico: los hormigones hechos con el método de mezclado en etapas son levemente menos densos (del orden de 1% menos) que los hormigones fabricados de manera tradicional. La explicación a esta disposición puede ser que el método de mezclado en etapas lleva a una mayor cantidad de aire atrapado en la pasta de hormigón, puesto que al revolver los distintos materiales de manera separada se posibilita la aparición de este aire.

### 6.1.3 Contenido de aire

A continuación se presenta un gráfico que muestra los porcentajes de contenido de aire en cada hormigón según el nivel de árido reciclado y el proceso de mezclado:



**Figura 30 Variación del contenido de aire en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado**

De la Figura 30 se pueden observar 2 fenómenos en cuanto al contenido de aire en los distintos hormigones fabricados.

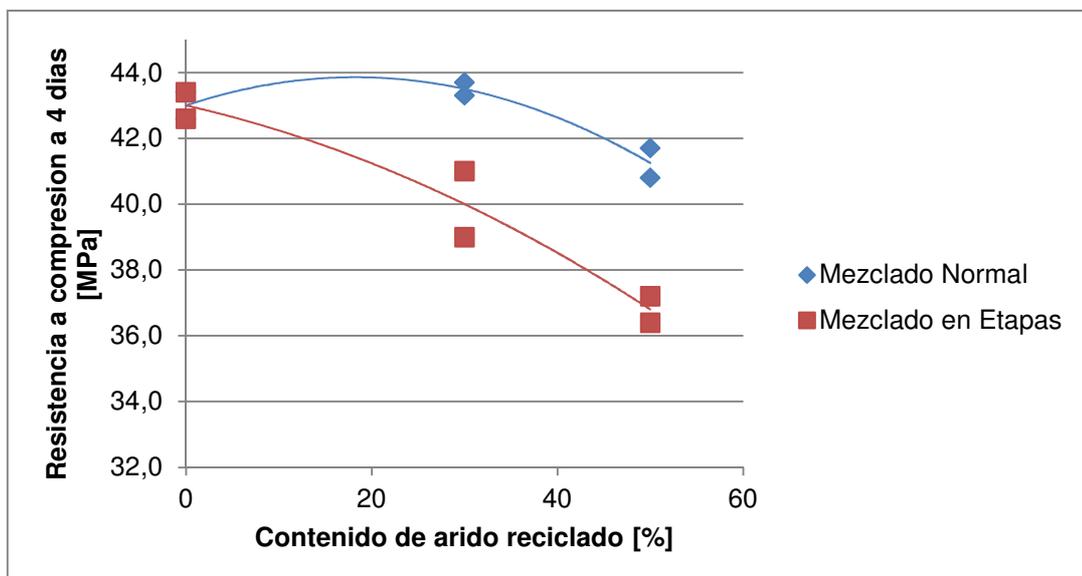
El primero es que los hormigones con más árido reciclado contienen un porcentaje levemente más alto de aire que los con menos árido reciclado, lo que concuerda con lo que se esperaba ya que los áridos reciclados son más porosos y entonces atrapan más aire que los áridos naturales.

El segundo fenómeno es que los hormigones hechos con el mezclado en etapas obtuvieron porcentajes de aire contenido levemente más altos que los hormigones tradicionales; eso se debe a que el método de mezclado en etapas permite la incorporación de más aire en la pasta del hormigón al fabricarlo, ya que se introducen y se revuelven los materiales por separado, y al revolver se incorpora más aire a la pasta.

## 6.2 Resistencia a compresión

De los resultados de los ensayos de compresión a 4, 7 y 28 días de los 6 tipos de hormigones que se fabricaron (Tabla 16), se obtuvieron las curvas que se muestran en las Figuras 31 a 33, las que se analizan en el punto siguiente.

### 6.2.1 Compresión a 4 días



**Figura 31** Variación de la resistencia a compresión a 4 días en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado

### 6.2.2 Compresión a 7 días

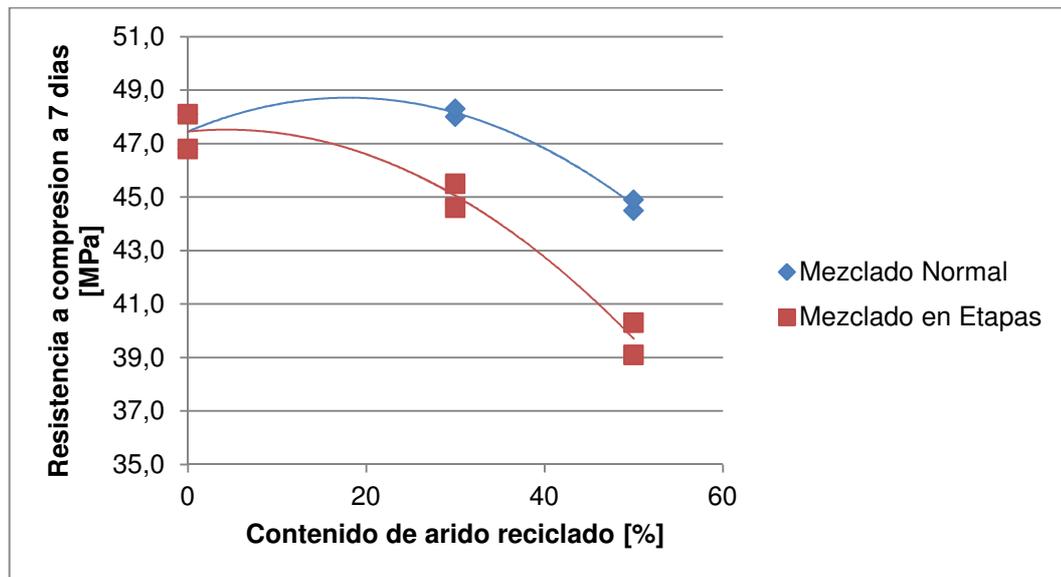


Figura 32 Variación de la resistencia a compresión a 7 días en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado

### 6.2.3 Compresión a 28 días

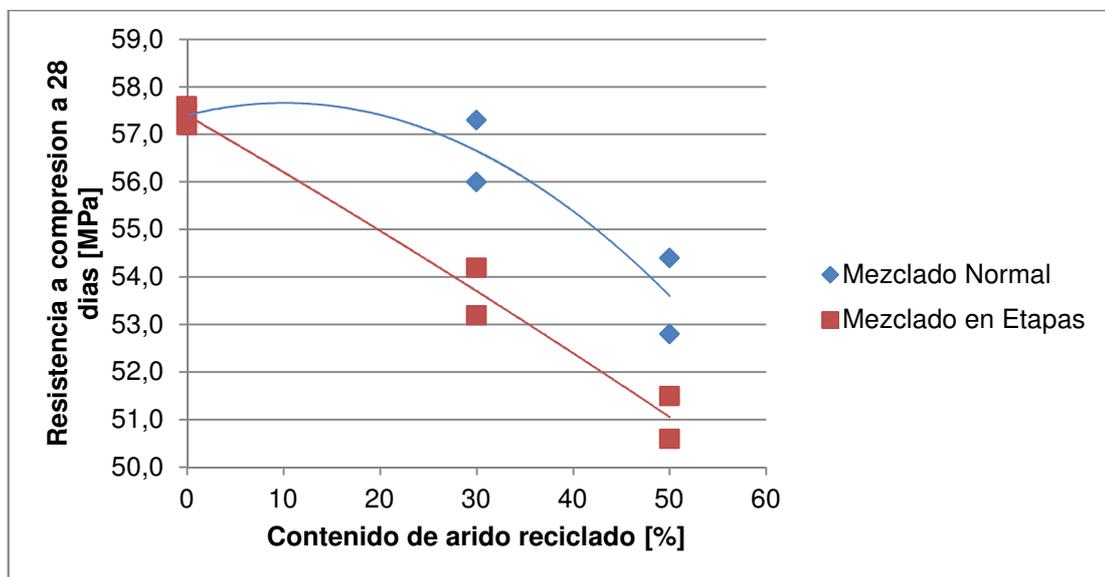
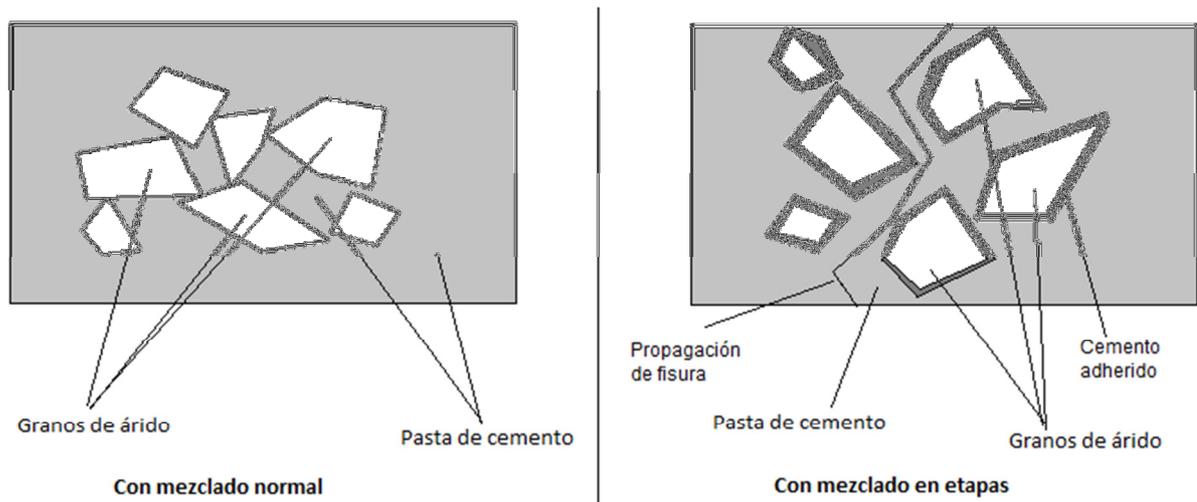


Figura 33 Variación de la resistencia a compresión a 28 días en función del contenido de árido reciclado y del proceso de mezclado

#### **6.2.4 Análisis de resultados de los ensayos de resistencia a compresión**

De los gráficos anteriores se observa primero que ambas curvas de mezclado normal y en etapas siguen una misma tendencia cualquier sea el edad de las probetas de hormigón. Esta tendencia muestra que la resistencia a compresión del hormigón baja con el aumento del contenido en árido reciclado, y eso con ambos métodos de mezclado. El hecho de que ocurra este fenómeno es consistente con la naturaleza misma de las partículas de árido reciclado, como se demostró en el análisis de los áridos reciclados y en los varios estudios considerados para este Trabajo de Título. Al contener un porcentaje más alto de árido reciclado, la pasta de hormigón se vuelve más débil puesto que los granos formando su esqueleto rígido son ellos mismos más débiles que las partículas de árido virgen, como se explicó anteriormente. Entonces, mientras más árido reciclado en la mezcla de hormigón, menos resistente esta mezcla, lo que concuerde con los estudios previos ya analizados.

Como segunda observación, se puede apreciar el hecho de que la resistencia a compresión de los hormigones mezclados en etapas con árido reciclado es más baja que la de los hormigones con árido reciclado mezclado en forma normal, lo que no es el comportamiento esperado. Ello se puede explicar por varias razones, dentro de las cuales aparece el factor humano y el hecho de que este método de mezclado en etapas sea nuevo y entonces poco dominado. Pero la razón prevalente puede ser que, al aplicar este mezclado en varias etapas, se notaron varios puntos negativos: en la primera etapa de mezclado del cemento, del árido reciclado y de la mitad del agua, quedó mucho material fino pegado a las paredes de la betonera, que fueron despegados manualmente; luego, de la misma forma se puede suponer que se formaron aglutinamientos de cemento no hidratado alrededor de las partículas de áridos reciclados, impidiendo la buena hidratación del cemento. Este mismo fenómeno llegó a la formación de granos de árido reciclado con cemento más gruesos que lo original, lo que influyó en la trabazón del esqueleto sólido del hormigón formado por los granos de árido; se esquematiza a continuación en la Figura 34:



**Figura 34 Diferencia entre los esqueletos de los hormigones**

Todo este comportamiento puede tener origen en que los áridos reciclados y vírgenes usados fueron más finos de lo previsto, y que la envoltura de cemento, que se creó al mezclar con cemento, produjo una disminución en la resistencia al corte del esqueleto granular (por disminución de adherencia pasta/partículas), con la consiguiente disminución en la resistencia a compresión del hormigón.

Al intentar explicar el hecho de que el mezclado en etapas no resultó mejorar la resistencia a compresión del hormigón con árido reciclado, aparece el tamaño y las características volumétricas de las partículas de árido reciclado. En principio, los granos reciclados se obtuvieron con un tamaño máximo menor que los que se usaron en otros estudios: los áridos que se usaron en este trabajo contiene proporciones mayores de fino, como se muestra la Tabla 18:

**Tabla 18 Granulometría comparada de los áridos reciclados**

<b>ASTM</b>	<b>mm</b>	<b>Árido reciclado Trabajo</b>	<b>Árido reciclado Paper<sup>23</sup></b>
1 "	25		100
¾ "	20		94
½ "	12,5	100	66
3/8 "	10	92	59
4	5	57	47
8	2,5	32	31
16	1,25	18	19
30	0,63	10	10
50	0,315	6	1
100	0,16	4	0

Al comparar la granulometría de los áridos, se observa que el árido usado en este estudio es bastante más fino que el utilizado en el estudio del paper<sup>23</sup>, lo que ha podido influir en la primera etapa del mezclado, es decir al mezclar y revolver un minuto el polvo de cemento, el árido reciclado y la mitad del agua. En efecto, al ser menos grueso, el árido permite la formación de costra de cemento alrededor de sus granos, lo que impide una hidratación completa del cemento que se queda adherido a sus paredes. Como se sabe que las partículas recicladas son muy absorbentes, se puede suponer que el cemento queda sin hidratarse ya que el agua estuvo absorbida por el árido reciclado mismo. El mortero antiguo adherido tampoco puede volver a reaccionar, así que se pierden una cantidad relevante de reacciones de hidratación en la pasta de hormigón, lo que puede explicar la pérdida de resistencia del hormigón hecho en etapas.

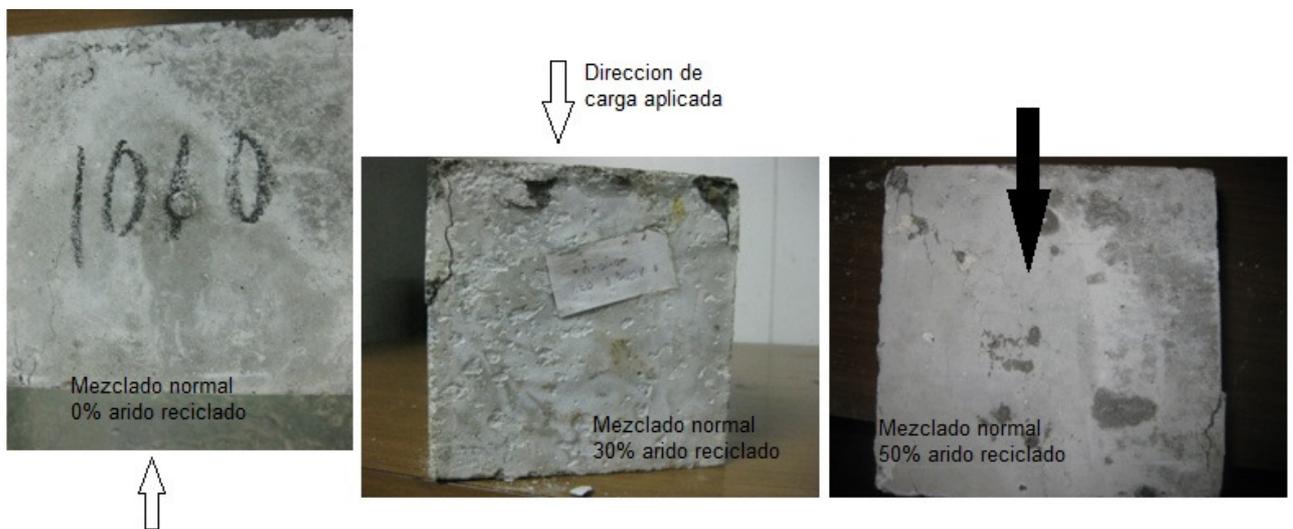
Además, no solamente son menos gruesos: los granos de áridos reciclados que se usaron también tienen características de forma y tamaño de partículas no óptimas. En efecto, la relación superficie/volumen de las partículas recicladas se aprecia muy desfavorable, más alta de lo esperable, puesto que muchas partículas son muy planas, y no cúbicas como sería el óptimo. Esta gran superficie les vuelve más débiles y menos macizos; por lo tanto, al ser más livianos, tienden a flotar en la pasta de hormigón y favorecen así una menor compacidad del esqueleto de áridos y su baja resistencia.

<sup>23</sup> SALAS Andres, ROESLER Jeffery R., LANGE David. *Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements*. University of Illinois, Estados- Unidos, Abril 2010

### 6.2.5 Estudio del tipo de fallas

Con el fin de explicar la respuesta obtenida para los hormigones confeccionados mediante el método en etapas, se decidió observar las probetas del ensayo de resistencia a compresión a 28 días. Esta observación tiene como objetivo ver y analizar las fallas visibles en los cubos, para deducir si existen características propias para la falla de los distintos hormigones estudiados correspondiendo.

Entonces, se observaron patrones de fisuras en las caras de los cubos ensayados a 28 días, las cuales se muestran en las siguientes fotografías:



**Figura 35 Fisuras del cubo patrón - mezclado normal**

Para la primera serie de hormigones fabricados con el método de mezclado tradicional, los cubos del hormigón con un 50% de árido reciclado aparecen con más fisuras que los otros cubos; de hecho, se observa que mientras más alto el contenido en árido reciclado, más dañadas las probetas. También se nota un fenómeno de descascaramiento en todos los cubos.

Sin embargo, cabe destacar que las fisuras parecen similares en las 6 probetas ensayadas para esta serie con mezclado normal. Las fallas surgen sobre todo cerca de las esquinas de los cubos, y se propagan de manera aproximadamente lineal hasta el centro de las caras.

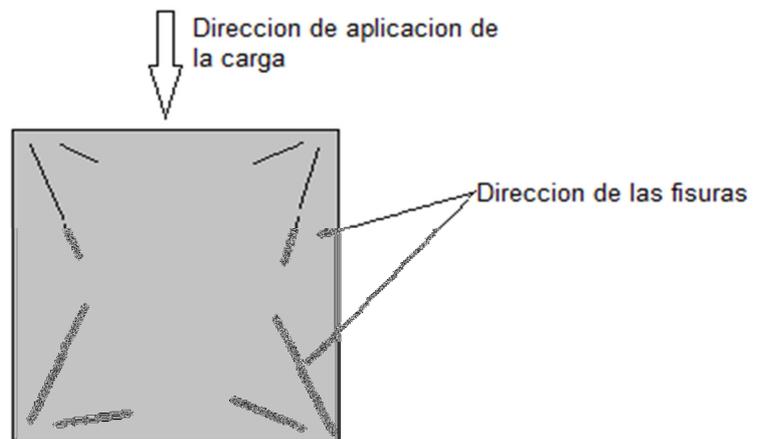
A continuación se muestran las fotografías de la segunda serie de hormigones fabricados con el método de mezclado en etapas:



**Figura 36 Fisuras del cubo patrón - mezclado en etapas**

El análisis de aquellos cubos mezclados en etapas es similar al de los cubos de la serie con mezclado normal, es decir que aparece la misma tendencia de que mientras más árido reciclado en la mezcla, más fisuras se notan. Se nota también el mismo fenómeno de descascaramiento.

Luego, al comparar ambas series difiriendo por el método de mezclado, se observa que los cubos con árido reciclado tienen el mismo tipo de fisuras, lo cual se esquematiza a continuación:

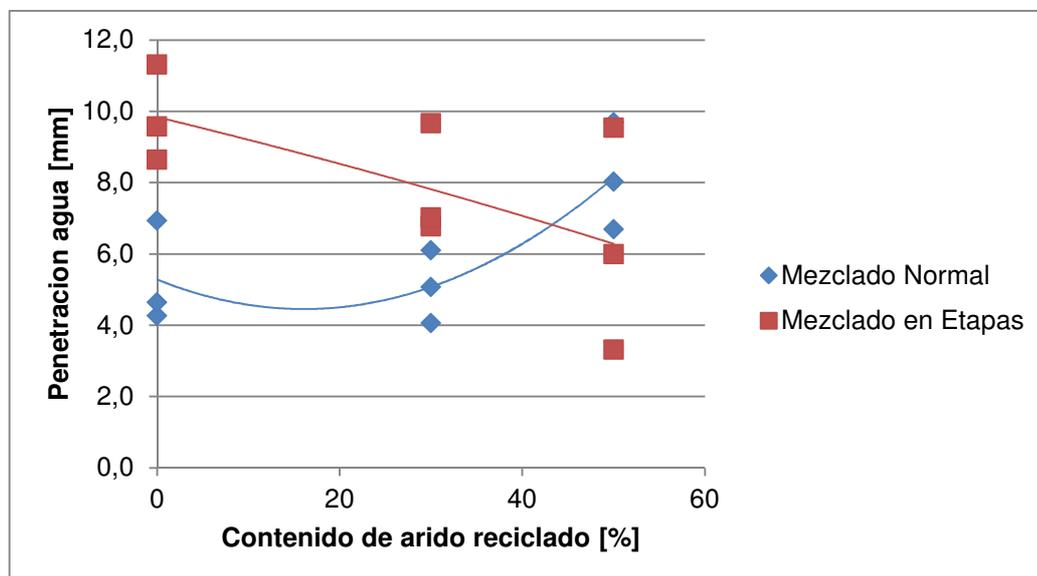


**Figura 37 Patrón de fisuras de las probetas de hormigón**

Por lo, no existe diferencia significativa entre ellos, lo que permite descartar la hipótesis de distintos mecanismos de falla según el contenido de árido reciclado y el método de mezclado.

### 6.3 Impermeabilidad

A continuación se analizan los resultados del ensayo de impermeabilidad por penetración de agua bajo presión.



**Figura 38 Variación de la penetración de agua en función del contenido de árido reciclado**

De este gráfico se deducen varios fenómenos.

Para la serie mezclada según procedimiento convencional, se observa que la penetración del agua en promedio crece con el contenido de árido reciclado, lo que concuerda con las propiedades del árido reciclado, sobre todo su mayor capacidad de absorción de agua. Esta tendencia no aparece claramente con 30% de árido reciclado, pero sí se nota visiblemente con 50% de árido reciclado; por lo tanto, es posible deducir que 30% de árido reciclado puede ser un límite para su uso.

No obstante, para la serie mezclada según el procedimiento en etapas, el comportamiento es bastante distinto: la penetración de agua disminuye con el porcentaje de árido reciclado. Eso puede ser explicado por el fenómeno de aglutinamiento de polvo de cemento sin reaccionar alrededor de las partículas de árido reciclado, explicado en el párrafo 6.2.4, lo que las volvieron menos absorbentes: en efecto, al tener polvo de cemento no hidratado adherido, los granos reciclados no tienen la posibilidad de absorber tanto agua como antes, lo que permite suponer que se dificulta la trayectoria del agua a través de la zona de transición árido/pasta.

Además, se observa que el hormigón mezclado en etapas con 50% de árido reciclado presenta menor penetración de agua que el con 30% de árido reciclado, lo que se explica por el mismo fenómeno: mientras mayor es la proporción de árido reciclado, más cemento no hidratado adherido a la interfaz de las partículas y menos permeable el hormigón, puesto que todo este material cementíceo sin reaccionar bloquea la penetración del agua dentro del hormigón mismo.

Por lo tanto, se puede estimar que en el caso del comportamiento frente a la penetración de agua del hormigón fabricado con árido reciclado, resultó de mejor desempeño. Esta tendencia se nota más claramente mientras más árido reciclado, es decir que el valor de penetración de agua del hormigón mezclado en etapas con 50% de árido reciclado es menor que el del hormigón mezclado normalmente con la misma cantidad de árido reciclado, lo que no es el caso para los hormigones con 30% de árido reciclado.

## CAPITULO 7 Conclusiones y recomendaciones

De este Trabajo de Título, se puede concluir lo siguiente.

La modificación del proceso de fabricación de los hormigones en estudio, variando el contenido de árido reciclado, entregó resultados distintos a lo esperado. En efecto, se deseaba mejorar la resistencia a compresión de los hormigones confeccionados con árido reciclado modificando el proceso de mezclado, y eso no fue lo obtenido (de hecho ocurrió lo contrario). Dentro de las razones que pueden explicar este distinto comportamiento, se pueden destacar las siguientes como principales: el tamaño más chico y la granulometría más fina del árido reciclado usado; la forma no óptima de las partículas de áridos reciclados, derivada indirectamente del tamaño de aquellas partículas; y finalmente, la novedad del método de mezclado en etapas que lo volvió menos fiable.

Sin embargo, es posible destacar las siguientes conclusiones con respecto a un uso factible de árido reciclado en hormigón estructural:

1. Se alcanzaron valores de resistencia a compresión a 28 días en promedio de 55 MPa para los hormigones con 30% y una razón A/C de 0,52 y 52 MPa para los hormigones con 50% de árido reciclado y la misma razón A/C, con respecto a unos valores de promedio 57 MPa para los hormigones patrones; los valores alcanzados son calificados como aceptables para un uso estructural de este tipo de hormigón.
2. Las propiedades físicas del hormigón en estado fresco, con 30% y 50% de árido reciclado, tienden a tener valores menores que las de un hormigón con árido virgen. Sin embargo, estas diferencias no son tan significativas como para impedir el uso de este tipo de material.

Luego, en el caso de la impermeabilidad al agua de los hormigones estudiados, los resultados mostraron que el método de mezclado en etapas sí mejoró el comportamiento al reducir la profundidad de penetración de agua a presión en los hormigones con árido reciclado, sobre todo en el caso de una proporción de 50% de árido reciclado.

En cuanto a tiempo y costo, reciclar el hormigón para utilizarlo como árido parece todavía complicado en Chile, ya que no existen las facilidades para recoger, acopiar y chancar este material. No obstante, su desarrollo parece factible y promisorio, al existir una mayor demanda por su uso en la construcción.

Además, no hace falta demostrar la sustentabilidad del hormigón reciclado, puesto que presenta las ventajas de conservación del material natural bruto y ahorro de tiempo de viaje en el caso de la construcción en ciudades sin fuentes de aprovisionamiento de árido natural cercano.

Al terminar este estudio, se hacen las siguientes sugerencias para profundizar el análisis del hormigón con árido reciclado:

- Estudiar la influencia del tamaño máximo del árido reciclado en su desempeño en hormigones, tanto mezclados con el proceso tradicional como en etapas, y con distintos porcentajes de contenido de árido reciclado.
- Verificar si el método de amasado en etapas da origen a una barrera en la interfaz árido/pasta que mejore la impermeabilidad del hormigón.
- Fabricar otros hormigones de prueba para ajustar la razón  $A/C$  y producir hormigones con menos diferencias de consistencia y fluidez.
- Volver a tratar y chancar el material reciclado con el objetivo de alcanzar una granulometría más gruesa y más parecida a la de un árido natural.

## CAPITULO 8 Bibliografía

- CSI Cement Sustainability Initiative. *Recycling Concrete Full Report*. July 2009
- <http://www.greenunivers.com/2009/08/le-beton-des-montagnes-a-recycler-10646/>
- SEA Ancel. Le béton recycle: Process de fabrication. Francia. <<http://www.lebetonrecycle.com/process-de-fabrication.html>>. [Consulta : 22 agosto 2008].
- ALAEJOS GUTIÉRREZ Pilar. *Tipos y Propiedades de Áridos Reciclados en Catálogo de Residuos utilizables en construcción*. Informe CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente, España, 2008
- TAM W.Y.V., GAO X.F., TAM C.M. *Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach*. Cement and Concrete Research 35(6), Hong-Kong, 2005, 1195-1203.
- SALAS Andres, ROESLER Jeffery R., LANGE David. *Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements*. University of Illinois at Urbana-Champaign - Newmark Civil Engineering Laboratory, Estados-Unidos, Abril 2010.
- DE LARRARD François. *Construire en béton*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Noviembre 2002.
- VIDELA, C. *Antecedentes Generales del Hormigón en su Tecnología del Hormigón*, Depto Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- LATORRE OYANADEL Verónica Valeria. *Influencia del Contenido de Adiciones Puzolánicas y del Proceso de Elaboración de la Mezcla en la Resistencia Mecánica del Hormigón*. Tesis. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009.
- Comité ACI 116. Terminología del Cemento y del Hormigón. Estados-Unidos.
- RILEM *International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems Sustainable Development*. Sept 2004
- ACI American Concrete Institute Committee 555, *Removal and Reuse of Hardened Concrete*, ACI555R-01. 30 March 2001 American Society for Testing and Materials. ASTM C33 / C33M - 11 Standard Specifications for Concrete Aggregates. Estados Unidos, 1933. 11 p.

- American Society for Testing and Materials. ASTM C192 / C192M - 07 Standard Practices for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Estados Unidos. 8 p.
- MONTOYA Hector, PINO Cristián y VALDÉS Gonzalo. *Estudio – Reutilización de residuos de Hormigón*, Revista BIT, Chile, Marzo 2005
- AGUILAR Carlos, MUÑOZ María Pía y LOYOLA Oscar. *Estudio – El hormigón reciclado*, Revista BIT, Chile, Septiembre 2005
- SCHAEFER Vernon R., WANG Kejin *et al.* *Improving Portland Cement Concrete mix Consistency and Production Rate through Two-Stage Mixing*. Centre for Transportation Research and Education, 2007.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh163 Of.79: Áridos para morteros y hormigones – Requisitos Generales. Chile, 1979. 23 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh1037 Of.77: Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. Chile, 1977. 8 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh2262.Of1997: Hormigón y mortero - Métodos de ensayo - Determinación de la impermeabilidad al agua - Método de la penetración de agua bajo presión. Chile, 1997. 13 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh1017 EOf. 75: Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción. Chile, 1975. 11 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh171 EOf.75: Hormigón – Extracción de muestras de hormigón. Chile, 1975. 4 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh1018 EOf.77: Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio. Chile, 1977. 8 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh170 Of.85: Hormigón – Requisitos generales. Chile, 1985. 57 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh1019 Of.74: Construcción - Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento del cono de Abrams. Chile, 1974. 11 p.
- Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena NCh1564 Of.79 Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco. Chile, 1979. 11 p.

## **ANEXOS**

## **Anexo 1**

Planilla de resultados de ensayo de caracterización de los áridos reciclados



## **Anexo 2**

Planilla de datos de fabricación de los hormigones

FECHA DE CONFECCIÓN	13/10/2011	Oto:	Informe nº:
HORA DE CONFECCIÓN	9:44	Solicitante:	Julie (Memoria)
IDENTIFICACIÓN AMASADA	NMA-RAO		
MARCA COMERCIAL DEL CEMENTO	Melon Extra		
PROPÓSITO O VERIFICACIÓN			
CONO DE DISEÑO	Seis B + - 1		
TIPO PROBETAS Y EDADES			
CURADOS INICIAL Y LABORATORIO			

11/10/2012 @LC

DOSIFICACIÓN

Materiales y Procedencias	1m³ (árido seco)	dosis	absorción	humedad	1 m³ (húmedo)	50 Litros húmedo
CEMENTO Melon Extra	448,3	---	---	---	448	22,4
GRAVA Natural	750	---	0,0%	4,0%	757,5	37,88
GRAVILLA Reciclada	0	---	7,03%	9,9%	0	0
ARENA 1 Natural	750	---	1,6%	2,5%	768,7	38,44
ARENA 2		---	%	%		
ADITIVO 1						
ADITIVO 2						
AGUA LIBRE	260	---	---	---	260	13
AGUA TOTAL	0 Litros	---	---	---	233,7	11,68

0

AMASADA

AGUA DE AMASADO	9,68	+				
HORARIO DEL ASENTAMIENTO	9:54					
TIEMPO DEL ASENTAMIENTO minutos	Inicial	20	40	60	Rec	
ASENTAMIENTOS DE CONO	13					
TEMPERATURAS HORMIGÓN	20.2°C					
TEMPERATURA AGUA DE AMASADO	23,4°C				TEMPERATURA ARENAS 16,7°C	
TEMPERATURA DE CEMENTO	19,7°C				TEMP DE MEZCLA (en betonera) 19,1°C	
MASA DEL HORMIGÓN	18,88 kg				VOLUMEN MEDIDA 8,021L	
HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE	69				CONTENIDO DE AIRE 1,2%	
TEMPERATURA AMBIENTE	18°C				DENSIDAD DE ADITIVOS ton/m³	Ad1 1,000 Ad2 1,000
DENSIDAD HORMIGÓN FRESCO	2354 kg/m³				VOLUMEN ADITIVOS cm³/amasada	Ad1 0 Ad2 0
PESO TOTAL COLADA					VOLUMEN COLADA	
RENDIMIENTO DE LA AMAÑADA					RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0,49

18.88

Hormigón de prueba realizado por		Revisado por	
FECHAS DE ENSAYO PRÓXIMAS			

0

RESULTADOS DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN

EDAD ENSAYO (días)	PESO (kg)	DIMENSIONES (mm)								CARGA MÁXIMA (kgf)	DENSIDAD (kg/m³)	RESISTENCIA en CUBO de 20 cm (kgf/cm²)	RESISTENCIA PROMEDIO (kgf/cm²)
		a1	a2	a3	a4	h1	h2	h3	h4				
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	

0

Notas de ensayos adicionales


Ensayado por: \_\_\_\_\_ Revisado por: \_\_\_\_\_

2146



FECHA DE CONFECCIÓN	13/10/2011	Ote:	Informe nº:
HORA DE CONFECCIÓN	10:18	Solicitante:	Juha (Memoria)
IDENTIFICACIÓN AMASADA	NMA-RA30		
MARCA COMERCIAL DEL CEMENTO	Cemento Melon Extra		
PROPÓSITO O VERIFICACIÓN			
CONO DE DISEÑO	Seis	8 + - 1	
TIPO PROBETAS Y EDADES			
CURADOS INICIAL Y LABORATORIO			

11/10/2011 @ LC

DOSIFICACIÓN

Materiales y Procedencias	1 m <sup>3</sup> (árido seco)	dosis	absorción	humedad	1 m <sup>3</sup> (húmedo)	50 Litros húmedo
CEMENTO	Melón Extra 448	---	---	---	448	22,4
GRAVA	Natural 525	---	0,42%	1,0 %	530,2	26,51
GRAVILLA	Redondeada 225	---	7,03%	2,9 %	245,5	12,36
ARENA 1	Natural 750	---	1,60%	2,5%	768,7	38,44
ARENA 2		---	%	%		
ADITIVO 1			---	---		
ADITIVO 2			---	---		
AGUA LIBRE	260	---	---	---	260	13
AGUA TOTAL	0 Litros	---	---	---	215,5	10,69

0

AMASADA

AGUA DE AMASADO	9.09 +				
HORARIO DEL ASENTAMIENTO	10:28			18:11:28	
TIEMPO DEL ASENTAMIENTO minutos	Inicial	20	40	60	Rec
ASENTAMIENTOS DE CONO	8.5			6.5	
TEMPERATURAS HORMIGÓN	20.4°C			18.9	
TEMPERATURA AGUA DE AMASADO	21.1°C			TEMPERATURA ARENAS	16.9°C
TEMPERATURA DE CEMENTO	18.3°C			TEMP DE MEZCLA (en betonera)	19.0°C
MASA DEL HORMIGÓN	18.67 kg			VOLUMEN MEDIDA	8.04 L
HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE	69			CONTENIDO DE AIRE	1.7%
TEMPERATURA AMBIENTE	18°C			DENSIDAD DE ADITIVOS ton/m <sup>3</sup>	Ad1 1,000 Ad2 1,000
DENSIDAD HORMIGÓN FRESCO	2327,6 kg/m <sup>3</sup>			VOLUMEN ADITIVOS cm <sup>3</sup> /amasada	Ad1 0 Ad2 0
PESO TOTAL COLADA				VOLUMEN COLADA	
RENDIMIENTO DE LA AMAÑADA				RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0,49

Hormigón de prueba realizado por		Revisado por	
FECHAS DE ENSAYO PRÓXIMAS			

0

RESULTADOS DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN

EDAD ENSAYO (días)	PESO (kg)	DIMENSIONES (mm)								CARGA MÁXIMA (kgf)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA en CUBO de 20 cm (kgf/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA PROMEDIO (kgf/cm <sup>2</sup> )
		a1	a2	a3	a4	h1	h2	h3	h4				
x		150	150	150	150	150	150	150	150	0	0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150	0	0		
x		150	150	150	150	150	150	150	150	0	0		
x		150	150	150	150	150	150	150	150	0	0		
x		150	150	150	150	150	150	150	150	0	0		
x		150	150	150	150	150	150	150	150	0	0		

0

Notas de ensayos adicionales


2142

Idiem

## FORMULARIO HORMIGÓN DE PRUEBA 2010 - xxx

03-10-2011 16:13

FECHA DE CONFECCIÓN	13/10/2011	Ote:	Informe nº:
HORA DE CONFECCIÓN	10:54	Solicitante:	Julie (Memoria)
IDENTIFICACIÓN AMASADA	NMA-RASO		
MARCA COMERCIAL DEL CEMENTO	Cemento Melon Extra		
PROPÓSITO O VERIFICACIÓN			
CONO DE DISEÑO	Seis 8 + . 1		
TIPO PRÓBETAS Y EDADES			
CURADOS INICIAL Y LABORATORIO			

Materiales y Procedencias		1m <sup>3</sup> (árido seco)	dosis	absorción	humedad	1 m <sup>3</sup> (húmedo)	50 Litros húmedo
CEMENTO	Melon Extra	448	---	---	---	448	22,4
GRAVA	Natural	375	---	0,40%	1,0%	378,7	18,94
GRAVILLA	Reciclada	375	---	7,03%	9,9%	409,1	20,61
ARENA 1	Natural	750	---	1,60%	2,5%	768,7	38,44
ARENA 2			---	%	%		
ADITIVO 1			---	---	---		
ADITIVO 2			---	---	---		
AGUA LIBRE		260	---	---	---	260	13
AGUA TOTAL		0 Litros	---	---	---	203,4	10,17

0		AMASADA					
AGUA DE AMASADO	9,5l +						
HORARIO DEL ASENTAMIENTO	11:02					12:02	
TIEMPO DEL ASENTAMIENTO minutos	Inicial	20	40	60	Rec		
ASENTAMIENTOS DE CONO	9					6,5	
TEMPERATURAS HORMIGÓN	19,4					18,9	
TEMPERATURA AGUA DE AMASADO	21,0 °C	TEMPERATURA ARENAS				17,0 °C	
TEMPERATURA DE CEMENTO	19,1 °C	TEMP DE MEZCLA (en betonera)				18,9 °C	
MASA DEL HORMIGÓN	18,63 kg	VOLUMEN MEDIDA				8,02L	
HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE	76	CONTENIDO DE AIRE				1,9 %	
TEMPERATURA AMBIENTE	18,1 °C	DENSIDAD DE ADITIVOS ton/m <sup>3</sup>		Ad1	1,000	Ad2	1,000
DENSIDAD HORMIGÓN FRESCO	2297,7 kg/m <sup>3</sup>	VOLUMEN ADITIVOS cm <sup>3</sup> /amasada		Ad1	0	Ad2	0
PESO TOTAL COLADA		VOLUMEN COLADA					
RENDIMIENTO DE LA AMASADA		RELACIÓN AGUA/CEMENTO				0,55	

Hormigón de prueba realizado por		Revisado por	
FECHAS DE ENSAYO PRÓXIMAS			

0		RESULTADOS DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN											
EDAD ENSAYO (días)	PESO (kg)	DIMENSIONES (mm)								CARGA MÁXIMA (kgf)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA en CUBO de 20 cm (kgf/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA PROMEDIO (kgf/cm <sup>2</sup> )
		a1	a2	a3	a4	h1	h2	h3	h4				
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	

0		Notas de ensayos adicionales											

FECHA DE CONFECCIÓN	17/10/2011	Ote:	Informe n°:
HORA DE CONFECCIÓN	10:34	Solicitante:	Juce
IDENTIFICACIÓN AMASADA	TSMA-RAO		1013
MARCA COMERCIAL DEL CEMENTO	Cemento Melon Extra		
PROPÓSITO O VERIFICACIÓN			
CONO DE DISEÑO	Seis	+	-
TIPO PROBETAS Y EDADES			
CURADOS INICIAL Y LABORATORIO			

11/10/2011 @ Lc

Materiales y Procedencias		1m³ (árido seco)	dosís	absorción	humedad	1 m³ (húmedo)	50 Litros húmedo
CEMENTO	Melon Extra	448	---	---	---	448	22,14
GRAVA	Natural	750	---	0,40%	2,1%	757,5	38,20
GRAVILLA	Rocidada	0	---	7,03%	8,0%	0	0
ARENA 1	Natural	750	---	1,40%	2,1%	768,7	38,29
ARENA 2			---	%	%		
ADITIVO 1				---	---		
ADITIVO 2				---	---		
AGUA LIBRE		260	---	---	---	260	13
AGUA TOTAL		0 Litros	---	---	---	233,7	4,62

804 800  
37,5  
37,5  
6,79  
0,79

0		AMASADA					
AGUA DE AMASADO	9,62	+					
HORARIO DEL ASENTAMIENTO	10:42						
TIEMPO DEL ASENTAMIENTO minutos	Inicial	20	40	60	Rec		
ASENTAMIENTOS DE CONO	12,5						
TEMPERATURAS HORMIGÓN	22,2°C						
TEMPERATURA AGUA DE AMASADO	23°C				TEMPERATURA ARENAS	17,2°C	
TEMPERATURA DE CEMENTO	29,5°C				TEMP DE MEZCLA (en betonera)	19,5°C	
MASA DEL HORMIGÓN	18,81 kg				VOLUMEN MEDIDA	8,02L	
HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE	70				CONTENIDO DE AIRE	1,3%	
TEMPERATURA AMBIENTE	18,6°C				DENSIDAD DE ADITIVOS ton/m³	Ad1 1,000 Ad2 1,000	
DENSIDAD HORMIGÓN FRESCO	2365,1 kg/m³				VOLUMEN ADITIVOS cm³/amazada	Ad1 0 Ad2 0	
PESO TOTAL COLADA					VOLUMEN COLADA		
RENDIMIENTO DE LA AMAZADA					RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0,48	
Hormigón de prueba realizado por					Revisado por		
FECHAS DE ENSAYO PRÓXIMAS							

0		RESULTADOS DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN											
EDAD ENSAYO	PESO	DIMENSIONES (mm)								CARGA MÁXIMA	DENSIDAD	RESISTENCIA en CUBO de 20 cm	RESISTENCIA PROMEDIO
(días)	(kg)	a1	a2	a3	a4	h1	h2	h3	h4	(kgf)	(kg/m3)	(kgf/cm2)	(kgf/cm2)
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	

0		Notas de ensayos adicionales									

2145



FORMULARIO HORMIGÓN DE PRUEBA 2010 - xxx

03-10-2011 16:13

FECHA DE CONFECCIÓN	17/10/2011	Ote:	Informe nº:
HORA DE CONFECCIÓN	10:58	Solicitante:	
IDENTIFICACIÓN AMASADA	TSNA-RA30		→ 1014
MARCA COMERCIAL DEL CEMENTO	Cemento Melon Extra		
PROPÓSITO O VERIFICACIÓN			
CONO DE DISEÑO	Seis	+	-
TIPO PROBETAS Y EDADES			
CURADOS INICIAL Y LABORATORIO			

11/10/2011 @LC

DOSIFICACIÓN

Materiales y Procedencias	1m³ (árido seco)	dosis	absorción	humedad	1 m³ (húmedo)	50 Litros húmedo
CEMENTO	Melon Extra 448	---	---	---	448	22,4
GRAVA	Natural 225	---	0,40%	2,1%	530,2	26,70
GRAVILLA	Reciclado 225	---	7,03%	8,0%	245,5	12,15
ARENA 1	Natural 750	---	1,40%	2,1%	768,7	38,23
ARENA 2		---	%	%		
ADITIVO 1		---	---	---		
ADITIVO 2		---	---	---		
AGUA LIBRE	260	---	---	---	260	13
AGUA TOTAL	0 Litros	---	---	---	215,5	10,76

50L seco  
06.25  
11.25  
37.5  
0.55  
0.25  
0.75

0

AMASADA

AGUA DE AMASADO	9-16+				
HORARIO DEL ASENTAMIENTO	11:10			12:10	
TIEMPO DEL ASENTAMIENTO minutos	Inicial	20	40	60	Rec
ASENTAMIENTOS DE CONO	6			3,5	
TEMPERATURAS HORMIGÓN	20,8 °C			18,4	
TEMPERATURA AGUA DE AMASADO	22,0 °C			TEMPERATURA ARENAS	17,3 °C
TEMPERATURA DE CEMENTO	18,5 °C			TEMP DE MEZCLA (en betonera)	
MASA DEL HORMIGÓN	18,57 kg			VOLUMEN MEDIDA	8,021 L
HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE	83			CONTENIDO DE AIRE	1,8 %
TEMPERATURA AMBIENTE	18,4 °C			DENSIDAD DE ADITIVOS ton/m³	Ad1 1,000 Ad2 1,000
DENSIDAD HORMIGÓN FRESCO	2315,2 kg/m³			VOLUMEN ADITIVOS cm³/amasa	Ad1 0 Ad2 0
PESO TOTAL COLADA				VOLUMEN COLADA	
RENDIMIENTO DE LA AMAÑADA				RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0,49

Hormigón de prueba realizado por		Revisado por	
FECHAS DE ENSAYO PRÓXIMAS			

0

RESULTADOS DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN

EDAD ENSAYO (días)	PESO (kg)	DIMENSIONES (mm)								CARGA MÁXIMA (kgf)	DENSIDAD (kg/m3)	RESISTENCIA en CUBO de 20 cm (kgf/cm2)	RESISTENCIA PROMEDIO (kgf/cm2)
		a1	a2	a3	a4	h1	h2	h3	h4				
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	

0

Notas de ensayos adicionales


2146

Idiem

FORMULARIO HORMIGÓN DE PRUEBA 2010 - xxx

03-10-2011 16.13

FECHA DE CONFECCIÓN		17/10/2011		Ote:	Informe nº:								
HORA DE CONFECCIÓN		11:27		Solicitante:	Julio								
IDENTIFICACIÓN AMASADA		T SMA - RASO											
MARCA COMERCIAL DEL CEMENTO		Cemento Melon Extra											
PROPÓSITO O VERIFICACIÓN													
CONO DE DISEÑO		Seis		+									
TIPO PRÓBETAS Y EDADES													
CURADOS INICIAL Y LABORATORIO													
11/10/2011 @LC		DOSIFICACIÓN											
Materiales y Proveniencias		1m <sup>3</sup> (árido seco)	dosis	absorción	humedad	1 m <sup>3</sup> (húmedo)	50 Litros húmedo						
CEMENTO	Melon <sup>o</sup> Extra	448	---	---	---	448	22,4						
GRAVA	Natural	375	---	0,40%	2,1%	378,7	19,14						
GRAVELLA	Redonda	375	---	7,03%	8,0%	409,1	20,25						
ARENA 1	Natural	750	---	1,40%	2,1%	768,7	38,23						
ARENA 2			---	%	%								
ADITIVO 1			---	---	---								
ADITIVO 2			---	---	---								
AGUA LIBRE		260	---	---	---	260	13						
AGUA TOTAL		0 Litros	---	---	---	203,4	10,3						
0		AMASADA											
AGUA DE AMASADO	9,8	+											
HORARIO DEL ASENTAMIENTO	11:38				12:40								
TIEMPO DEL ASENTAMIENTO minutos	Inicial	20	40	60	Rec								
ASENTAMIENTOS DE CONO	8,5				6,5								
TEMPERATURAS HORMIGÓN	20,8°C				19,8								
TEMPERATURA AGUA DE AMASADO	21,9°C		TEMPERATURA ARENAS		17,6°C								
TEMPERATURA DE CEMENTO	19,4°C		TEMP DE MEZCLA (en betonera)										
MASA DEL HORMIGÓN	18,27 kg		VOLUMEN MEDIDA		8,021L								
HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE	82		CONTENIDO DE AIRE		2,0%								
TEMPERATURA AMBIENTE	18,6°C		DENSIDAD DE ADITIVOS ton/m <sup>3</sup>		Ad1 1,000	Ad2 1,000							
DENSIDAD HORMIGÓN FRESCO	2278 kg/m <sup>3</sup>		VOLUMEN ADITIVOS cm <sup>3</sup> /amasada		Ad1 0	Ad2 0							
PESO TOTAL COLADA			VOLUMEN COLADA										
RENDIMIENTO DE LA AMAÑADA			RELACIÓN AGUA/CEMENTO		0,55								
Hormigón de prueba realizado por				Revisado por									
FECHAS DE ENSAYO PRÓXIMAS													
0		RESULTADOS DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN											
EDAD ENSAYO	PESO	DIMENSIONES (mm)								CARGA MÁXIMA	DENSIDAD	RESISTENCIA en CUBO de 20 cm	RESISTENCIA PROMEDIO
(días)	(kg)	a1	a2	a3	a4	h1	h2	h3	h4	(kgf)	(kg/m3)	(kgf/cm2)	(kgf/cm2)
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
x		150	150	150	150	150	150	150	150		0	0	0
0		Notas de ensayos adicionales											

501800

18,75

18,75

37,5

0,39

1,5

0,79

## **Anexo 3**

Planilla de resultados de ensayo de resistencia a compresión

Patrón ⊕ Líquido ⇒ menor resistencia  
 NMA  
 fcfm

(N,mm<sup>2</sup>)  
**Idiem.**  
EN SUVIDES CONTINUAS Y ROTULADO

LISTA DE ENSAYO PROBETAS CUBICAS

N°	N° Informe	Var. Cond.	N° Muestra	Cod. Prob.	Edad	N° Muec.	f <sub>co</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	f <sub>tr</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	f <sub>cd</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	f <sub>ct</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	D <sub>3</sub> (mm)	D <sub>4</sub> (mm)	D <sub>5</sub> (mm)	D <sub>6</sub> (mm)	Humedad (%)	Carta de Control (KN)	Carga máx. (KN)	f <sub>cu</sub> (MPa)	Err.
17/10	1	1010	Patrón	1	4		8,07	150	150	150	151	150	150	150	150	150			956	42,5	
	2	1010	⊕ Patrón	2	4		8,05	150											928	41,2	
	3	1011	Σ 0,3	1	4		7,98	150											983	43,7	
	4	1011	Σ 0,3	2	4		7,95	149	150										974	43,3	
	5	1012	0,5	1	4		7,89	150	150	151	150	150							938	41,7	
	6	1012	0,5	2	4		7,92	150	150	150	151	150							919	40,8	
20/10	7	1010	P	1	7		8,071	150	150	150	151	150							1004	44,6	
	8	1010	⊕ P	2	7		8,037	150											1052	46,8	
	9	1011	Σ 0,3	1	7		8,018	151	150										1080	48,0	
	10	1011	Σ 0,3	2	7		8,006	150											1086	48,3	
	11	1012	0,5	1	7		7,875	151	150										1001	44,5	
	12	1012	0,5	2	7		7,873	150											1010	44,9	
21/10	13	1013	P	1	4		8,075	150	151	150									958	42,6	
	14	1013	⊕ P	2	4		8,025	151	150										976	43,4	
	15	1014	Σ 0,3	1	4		7,910	150											878	39,0	
	16	1014	Σ 0,3	2	4		7,940	150											922	41,0	
	17	1015	0,5	1	4		7,800	150											818	36,4	
	18	1015	0,5	2	4		7,830	150											837	37,2	
24/10	19	1013	⊕ P	1	7		8,110	150											1054	46,8	
	20	1013	Σ P	2	7		8,060	150	150	150	149	150	150	150	150				1083	48,1	
	21	1014	Σ 0,3	1	7		7,950	150											1004	44,6	
	22	1014	⊕ 0,3	2	7		7,930	150			151	150							1024	45,5	
	23	1015	0,5	1	7		7,79	150	150	151	150								880	39,1	
	24	1015	0,5	2	7		7,85	150											906	40,3	

△ 1010, n=1 ⇒ problema con la prensa que se paró por sobre actividad.



LISTA DE ENSAYO PROBETAS CUBICAS



N°	N° Informe	Vol. Card	N° Muestra	Co. Prob	Edad	N° Módulo	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Esp. (mm)	Número		Carga max. Cúbica (KN)	Carga max. Torr. (KN)	f.c. (MPa)	f.c. (MPa)	
																1	2					
10/11	1		P	1	28		8,075	151	150													
	2		P	2	28		8,135	152	152										1281	56,9		
	3	<	0,3	1	28		7,995	150											1255	55,8		
	4	Σ	0,3	2	28		8,000	151	151										1260	56,0		
	5	Σ	0,5	1	28		7,900	150	151										1289	57,3		
	6		0,5	2	28		7,905	150	151										1189	52,8		
	7																		1223	54,4		
11/11	8		P	1	28		<del>8,075</del>	150	150	150	150	150							1295	57,6		
	9	<	P	2	28		8,13			151	151								1287	57,2		
	10	Σ	0,3	1	28		7,94			151	151								1198	53,2		
	11	Σ	0,3	2	28		7,98			152	151								1219	54,2		
	12	Σ	0,5	1	28		7,83			151									1158	51,5		
	13		0,5	2	28		7,85			151									1139	50,6		
	14																					
	15																					
	16																					
	17																					
	18																					
	19																					
	20																					
	21																					
	22																					
	23																					
	24																					

## **Anexo 4**

Planilla de resultados de ensayo de impermeabilidad

ANTECEDENTES:

SOLICITANTE	Jolo		
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	NCH 2262 Of 97		
NORMA DE ENSAYO	FECHA DE CONFECCIÓN HORMIGÓN		
EDAD DE ENSAYO	FECHA DE INICIO ENSAYO		
TIPO DE PRÓBETAS	<input type="checkbox"/> Cubos 20	<input checked="" type="checkbox"/> Cubos 15	<input type="checkbox"/> Testigos 15
PREPARACIÓN DE PRÓBETAS	<input type="checkbox"/> Marcado	<input type="checkbox"/> Raspado	<input type="checkbox"/> Sellado
OBSERVACIONES:	<input type="checkbox"/> Curado		

ENSAYO:

Probeta nº	Masa SSS (g)	Masa Sumergida (g)	Densidad probeta (kg/m <sup>3</sup> )
1			
2			
3			

Densidad, si corresponde:

Dirección de aplicación de carga:

Dirección	Cilindros - Testigos	<input type="checkbox"/> Cara superior	<input type="checkbox"/> Cara lateral	<input type="checkbox"/> Cara inferior
	Cubos	<input type="checkbox"/> paralela	<input type="checkbox"/> perpendicular	
		a la cara de llenado	a la cara de extracción	

Fecha	Hora	Presión kg/cm <sup>2</sup>	Hora filtrado	Notas	Operador

Resultados del ensayo:

Penetración de agua probeta nº 1 (mm)												PROMEDIO	MAXIMA
13	19	12	5	8	9	7	9	13	7	10,2	19	6,9	19
Penetración de agua probeta nº 2 (mm)												PROMEDIO	MAXIMA
3	3	5	5	7	8	9	9	15	13	7,7	15	4,3	15
Penetración de agua probeta nº 3 (mm)												PROMEDIO	MAXIMA
6	9	8	5	4	9	13	17	4	8,1	17	4,6	17	

Observaciones:  
 Ensayo efectuado por: \_\_\_\_\_  
 Revisado por: \_\_\_\_\_

86  
 83  
 102  
 1000 penetración

↓  
 6,9  
 4,3  
 4,6  
 Penetración  
 medir

ANTECEDENTES:

SOLICITANTE	
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	1011
NORMA DE ENSAYO	NCh 2262 Of 97
FECHA DE CONFECCION HORMIGON	
EDAD DE ENSAYO	
TIPO DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Cubos 20 <input checked="" type="checkbox"/> Cubos 15 <input type="checkbox"/> Testigos 15
FECHA DE INICIO ENSAYO	
PREPARACION DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Marcado <input type="checkbox"/> Raspado <input type="checkbox"/> Sellado <input type="checkbox"/> Curado
OBSERVACIONES	

Densidad, si corresponde:

Probeta n°	Masa SSS (g)	Masa Sumergida (g)	Densidad probeta (kg/m <sup>3</sup> )
1			
2			
3			

Dirección de aplicación de carga:

Dirección	Cubos			Cilindros - Testigos	
	<input type="checkbox"/> Cara superior	<input type="checkbox"/> Cara lateral	<input type="checkbox"/> Cara inferior	<input type="checkbox"/> perpendicular	<input type="checkbox"/> a la cara de llenado
	<input type="checkbox"/> paralela	<input type="checkbox"/> a la cara de extracción			

Fecha	Hora	Presión kg/cm <sup>2</sup>	Hora filtrado	Notas	Operador

Resultados del ensayo:

Penetración de agua probeta n° 1 (mm)												PROMEDIO	MAXIMA
4	6	9	9	8	11	14	15	12	7	9,5	15	5,1	
Penetración de agua probeta n° 2 (mm)												PROMEDIO	MAXIMA
6	7	8	9	11	15	17	19	14	10,4	19	6,1		
Penetración de agua probeta n° 3 (mm)												PROMEDIO	MAXIMA
6	7	6	6	14	7	6	5	9	10	7,6	14	4,0	

Observaciones:

Ensayo efectuado por: \_\_\_\_\_

Revisado por: \_\_\_\_\_



FORMULARIO DE ENSAYO SHO-FOR-802 DETERMINACIÓN DE LA IMPERMEABILIDAD AL AGUA - MÉTODO DE LA PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

ANTECEDENTES:

SOLICITANTE	
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	1012
NORMA DE ENSAYO	NCh 2262 Of 97
FECHA DE CONFECCIÓN HORMIGÓN	
EDAD DE ENSAYO	
TIPO DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Cubos 20 <input checked="" type="checkbox"/> Cubos 15 <input type="checkbox"/> Testigos 15 <input type="checkbox"/>
FECHA DE INICIO ENSAYO	
PREPARACIÓN DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Marcado <input type="checkbox"/> Rasado <input type="checkbox"/> Sellado <input type="checkbox"/> Curado
OBSERVACIONES:	

ENSAYO:

Densidad, si corresponde:

Probeta nº	Masa SSS (g)	Masa Sumergida (g)	Densidad probeta (kg/m3)
1			
2			
3			

Dirección de aplicación de carga:

Dirección	Cubos	<input type="checkbox"/> Cara superior <input type="checkbox"/> Cara lateral <input type="checkbox"/> Cara inferior	<input type="checkbox"/> paralela <input type="checkbox"/> perpendicular	a la cara de llenado a la cara de extracción
	Cilindros - Testigos			

Fecha	Hora	Presión kg/cm2	Hora filtrado	Notas	Operador

Resultados del ensayo:

	Penetración de agua probeta nº 1 (mm)										PROMEDIO	MÁXIMA	
	15	41	35	14	9	7	9	10	8	5			
95	15	41	35	14	9	7	9	10	8	5	15,3	41	9,7
	Penetración de agua probeta nº 2 (mm)										PROMEDIO	MÁXIMA	
	10	9	8	11	17	13	11	14	17	8			
85	10	9	8	11	17	13	11	14	17	8	11,8	17	6,7
	Penetración de agua probeta nº 3 (mm)										PROMEDIO	MÁXIMA	
	11	14	7	6	8	10	12	14	16	20			
102	11	14	7	6	8	10	12	14	16	20	11,8	20	8,0

Observaciones

Ensayo efectuado por: \_\_\_\_\_  
 Revisado por: \_\_\_\_\_



FORMULARIO DE ENSAYO SHO-FOR-802 DETERMINACIÓN DE LA IMPERMEABILIDAD AL AGUA - MÉTODO DE LA PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

ANTECEDENTES:

SOLICITANTE				
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	1013			
NORMA DE ENSAYO	NCh 2262 Of 97			
FECHA DE CONFECCIÓN HORMIGÓN				
EDAD DE ENSAYO				
TIPO DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Cubos 20	<input type="checkbox"/> Cubos 15	<input type="checkbox"/> Testigos 15	<input type="checkbox"/>
FECHA DE INICIO ENSAYO				
PREPARACIÓN DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Marcado	<input type="checkbox"/> Raspado	<input type="checkbox"/> Sellado	<input type="checkbox"/> Curado
OBSERVACIONES:				

ENSAYO:

Densidad, si corresponde:

Probeta nº	Masa SSS (g)	Masa Sumergida (g)	Densidad probeta (kg/m3)
1			
2			
3			

Dirección de aplicación de carga:

Dirección	Cubos	<input type="checkbox"/> Cara superior	<input type="checkbox"/> paralela	a la cara de llenado
	Cilindros - Testigos	<input type="checkbox"/> Cara lateral	<input type="checkbox"/> perpendicular	a la cara de extracción
<input type="checkbox"/> Cara inferior				

Fecha	Hora	Presión kg/cm2	Hora filtrado	Notas	Operador

Resultados del ensayo:

	Penetración de agua probeta nº 1 (mm)										PROMEDIO	MÁXIMA	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
117	6	7	7	15	12	24	22	17	22	13	14,5	24	11,31
99	3	11	9	10	9	11	12	26	30	24	14,5	30	9,57
90	12	22	18	22	22	15	16	17	7		14,4	22	8,64

Observaciones

15

Ensayo efectuado por: \_\_\_\_\_

Revisado por: \_\_\_\_\_

 <p>UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO</p>	<p>FORMULARIO DE ENSAYO SHO-FOR-802</p> <p>DETERMINACIÓN DE LA IMPERMEABILIDAD AL AGUA - MÉTODO DE LA PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN</p>
---	--

**ANTECEDENTES:**

SOLICITANTE				
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	1014			
NORMA DE ENSAYO	NCh 2262 Of 97			
FECHA DE CONFECCIÓN HORMIGÓN				
EDAD DE ENSAYO				
TIPO DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Cubos 20	<input type="checkbox"/> Cubos 15	<input type="checkbox"/> Testigos 15	<input type="checkbox"/>
FECHA DE INICIO ENSAYO				
PREPARACIÓN DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Marcado	<input type="checkbox"/> Raspado	<input type="checkbox"/> Sellado	<input type="checkbox"/> Curado
OBSERVACIONES:				

**ENSAYO:**

Densidad, si corresponde:

Probeta n°	Masa SSS (g)	Masa Sumergida (g)	Densidad probeta (kg/m3)
1			
2			
3			

Dirección de aplicación de carga:

Dirección	Cubos:	<input type="checkbox"/> Cara superior	<input type="checkbox"/> paralela	a la cara de llenado
	<input type="checkbox"/> Cara lateral	<input type="checkbox"/> perpendicular		
	Cilindros - Testigos	<input type="checkbox"/> Cara inferior		a la cara de extracción

Fecha	Hora	Presión kg/cm2	Hora filtrado	Notas	Operador

Resultados del ensayo:

Penetración de agua probeta n° 1 (mm)											PROMEDIO	MÁXIMA	
108	4	11	18	12	12	7	8	9	11	2	9,4	18	6,77
Penetración de agua probeta n° 2 (mm)											PROMEDIO	MÁXIMA	
90	5	11	14	15	16	15	12	17	29	27	16,1	29	9,66
Penetración de agua probeta n° 3 (mm)											PROMEDIO	MÁXIMA	
90	7	11	11	10	10	13	15	18	13	9	11,7	18	7,02

Observaciones

Ensayo efectuado por: \_\_\_\_\_

Revisado por: \_\_\_\_\_

 <p><b>Idiem</b> UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO</p>	<p>FORMULARIO DE ENSAYO SHO-FOR-802      DETERMINACIÓN DE LA IMPERMEABILIDAD AL AGUA - MÉTODO DE LA PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN</p>
--	--

**ANTECEDENTES:**

SOLICITANTE				
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	1015			
NORMA DE ENSAYO	NCh 2262 Of 97			
FECHA DE CONFECCIÓN HORMIGÓN				
EDAD DE ENSAYO				
TIPO DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Cubos 20	<input type="checkbox"/> Cubos 15	<input type="checkbox"/> Testigos 15	<input type="checkbox"/>
FECHA DE INICIO ENSAYO				
PREPARACIÓN DE PROBETAS	<input type="checkbox"/> Marcado	<input type="checkbox"/> Rasado	<input type="checkbox"/> Sellado	<input type="checkbox"/> Curado
OBSERVACIONES:				

**ENSAYO:**  
Densidad, si corresponde:

Probeta nº	Masa SSS (g)	Masa Sumergida (g)	Densidad probeta (kg/m3)
1			
2			
3			

**Dirección de aplicación de carga:**

Dirección	Cubos	<input type="checkbox"/> Cara superior <input type="checkbox"/> Cara lateral <input type="checkbox"/> Cara inferior	<input type="checkbox"/> paralela <input type="checkbox"/> perpendicular	a la cara de llenado  a la cara de extracción
-----------	-------	---	---	---

Fecha	Hora	Presión kg/cm2	Hora filtrado	Notas	Operador

**Resultados del ensayo:**

Penetración de agua probeta nº 1 (mm)										PROMEDIO	MÁXIMA		
81	6	13	10	12	17	11	9	9	11	13	11,1	17	5,99
Penetración de agua probeta nº 2 (mm)										PROMEDIO	MÁXIMA		
63	4	7	6	8	12	9	10	10	10	3	7,9	12	3,32
Penetración de agua probeta nº 3 (mm)										PROMEDIO	MÁXIMA		
135	6	7	7	13	14	16	6	8	15	14	10,6	16	9,54

Observaciones: \_\_\_\_\_

Ensayo efectuado por: \_\_\_\_\_

Revisado por: \_\_\_\_\_