



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EFFECTO DEL CURADO INTERNO EN HORMIGONES Y SU APLICACIÓN COMO MÉTODO COMPLEMENTARIO AL CURADO TRADICIONAL EN OBRA DEL HORMIGÓN

GASTÓN JALIL ESPINOZA HIJAZIN

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
MAURICIO LÓPEZ CASANOVA

Santiago de Chile, agosto, 2010

© 2010, Gastón Jalil Espinoza Hijazin



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EFFECTO DEL CURADO INTERNO EN HORMIGONES Y SU APLICACIÓN COMO MÉTODO COMPLEMENTARIO AL CURADO TRADICIONAL EN OBRA DEL HORMIGÓN

GASTÓN JALIL ESPINOZA HIJAZIN

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

MAURICIO LÓPEZ C.

CARLOS VIDELA C.

MAURICIO SALGADO T.

FRANCISCO WITTWER O.

GONZALO PIZARRO P.

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniera

Santiago de Chile, agosto, 2010

A mis padres, hermanos, novia, amigos,
familia y profesores.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres Gastón y Lina; mis hermanos Tania, Hanan y Tarek; y a mi tío Habis por todo su apoyo en momentos difíciles que atravesé durante esta etapa tan interesante y gratificante de mi vida. Ellos han sido un soporte y un impulso para tratar de ser un mejor hombre en todo aspecto.

Tampoco puedo olvidar agradecer la ayuda, paciencia y enseñanza del Dr. Mauricio López Casanova quien es mi profesor de magíster, mentor e inspirador en esta investigación, siendo él el gran responsable de los logros que he tenido y me ayudó a pasar de ser un alumno regular a un alumno con ganas de aprender un poco más de ingeniería. Su inspiración y ejemplo han sido un escalón gigante en este paso que estoy dando.

Agradezco a Álvaro Paul quien fue mi compañero de ensayos, experiencias, preparación de muestras y mi amigo durante toda esta etapa de magíster, sin duda él es uno de los principales aportes en este trabajo y no puede dejar de dar una mención especial a su apoyo.

También quiero agradecer a Ricardo Serpell, Daniel Moreno, Fernando Bustos, Ariela Astorga y Juan Pablo Cancino; quienes son mis compañeros de postgrado que participaron y opinaron muchas veces de los resultados de esta investigación ayudando a dar una visión externa que espero haya servido para tratar de entregar de una forma mejor el mensaje.

No puedo dejar de agradecer a Edith Garrido y Lidia Soto, quienes han sido un gran apoyo durante el enriquecedor período universitario. Muchas veces ellas me ayudaron en muchas cosas e hicieron momentos muy agradables en esta etapa, lo que siempre fue necesario.

Quiero agradecer a Patricio García, Mauricio Guerra y Patricio Pinilla quienes más que técnicos de laboratorio fueron unos grandes amigos e hicieron que estos dos años fuesen muchos más amenos y entretenidos.

Además, quiero agradecer al profesor Carlos Videla por sus consejos y apoyo alegre e incondicional cada vez que necesite escuchar alguna opinión de experiencia en temas relevantes a la ingeniería de construcción

También quiero agradecer el apoyo de Mario Olivares y al personal de DICTUC del área de RESMAT por el apoyo en preparación de muestras y ensayos, a los profesores Jorge Ramos y Patricio Pérez del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica por su colaboración en la etapa experimental.

No puedo dejar de agradecer a CONICYT Chile por financiar los costos de esta investigación a través del proyecto Fondecyt Regular n° 11060341.

Además quiero agradecer a Gonzalo Pizarro, Mauricio Salgado y Francisco Wittwer por ser parte del comité evaluador de esta tesis y por el esfuerzo y dedicación entregados.

Un agradecimiento cariñoso a Eduardo González, técnico de laboratorio del departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, quien siempre me ayudo en momentos que necesite una mano en el desarrollo e implementación de nuevas ideas y estrategias de ensayos.

Tampoco puedo dejar de agradecer a Jorge Donoso, quien siempre tuvo una gran voluntad al momento de darme ayuda y guía en los primeros pasos de esta investigación. Quiero agradecer a Guillermo Leiva y a Susana Jofré quienes han sido como unos segundos padres para mí y me dieron un hogar cuando más lo necesité, sin ellos esto hubiese sido mucho más difícil de lo que fue.

Finalmente quiero agradecer a mi novia Marianela Noriega, y a mi gran y querido amigo Alex Leiva por todas las veces que me acompañaron con un café durante varios de los muchos días, tardes y noches que tuve que estar en laboratorio para el desarrollo experimental de esta investigación. Hicieron de esto algo mucho más ameno y fue vital su apoyo y alegría en aquellos momentos que las fuerzas faltaban.

Sumo a estos agradecimientos a todos mis amigos y familiares que se han preocupado por mí y estuvieron pendientes de mi desarrollo personal y profesional durante estos años de carrera, cada gota de ánimo que me dieron fue fundamental para haber llegado al lugar que estoy hoy.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Estructura de tesis	1
1.2 Aspectos generales	2
1.3 Componentes del hormigón	4
1.3.1 Propiedades del cemento y de las puzolanas.....	5
1.3.2 Hidratación de los agentes cementicios	6
1.3.3 Retracción química y retracción autógena.....	7
1.4 Curado y su rol en la hidratación	9
1.5 Curado interno.....	11
1.5.1 Orígenes del curado interno.....	11
1.5.2 Resultados del curado interno	13

II.	SIGNIFICANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	14
2.1	Preguntas relevantes	14
2.2	Objetivos.....	16
2.2.1	Objetivo i)	16
2.2.2	Objetivo ii).....	17
2.3	Hipótesis	17
2.3.1	Hipótesis i)	17
2.3.2	Hipótesis ii).....	18
III.	ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	19
3.1	Extendiendo el curado interno a mezclas de hormigón con W/CM mayor a 0.42.....	19
3.1.1	Resumen.....	19
3.1.2	Introducción	20
3.1.2.1	Hidratación de materiales cementicios.....	20
3.1.2.2	Curado del hormigón	21
3.1.2.3	Aplicación del curado interno a hormigones tradicionales ..	22
3.1.2.4	Resultados de un curado efectivo en las propiedades del hormigón	22
3.1.3	Significancia de la investigación.....	23
3.1.4	Diseño experimental.....	24
3.1.4.1	Agente de curado utilizado.....	24
3.1.4.2	Diseño de mezclas.....	26
3.1.4.3	Ensayos realizados	27
3.1.5	Resultado de ensayos y análisis	29
3.1.5.1	Grado de hidratación	30
3.1.5.2	Resistencia a la compresión	35
3.1.5.3	Permeabilidad a los iones cloruros.....	37

3.1.6 Comparación estadística de las propiedades del hormigón y discusión de resultados	38
3.1.7 Conclusiones	40
3.1.8 Agradecimientos	42
3.1.9 Referencias	43
3.2 Influencia del curado interno en las propiedades de hormigones con cemento portland y puzolanas naturales	45
3.2.1 Resumen	45
3.2.2 Introducción	46
3.2.2.1 Hidratación de materiales cementicios.....	47
3.2.2.2 Reacciones químicas secundarias en cementos con puzolanas naturales	48
3.2.2.3 Características de hormigones con adiciones puzolánicas...	49
3.2.2.4 Uso de puzolanas naturales en el hormigón.....	50
3.2.2.5 Efectos de las puzolanas naturales en las propiedades del hormigón	50
3.2.2.6 Curado del hormigón.....	52
3.2.3 Significancia de la investigación.....	53
3.2.4 Etapa experimental.....	54
3.2.4.1 Procedimiento experimental	54
3.2.4.2 Ensayos realizados	58
3.2.5 Etapa de análisis de resultados de ensayos	60
3.2.5.1 Resistencia a la compresión	60
3.2.5.2 Permeabilidad a los iones cloruros.....	62
3.2.5.3 Retracción autógena	64
3.2.5.5 Discusión de resultados.....	66
3.2.6 Conclusiones.....	67
3.2.7 Agradecimientos	69
3.2.8 Referencias	70

IV. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.....	75
4.1 Conclusiones de la investigación.....	76
4.1.1 Conclusiones hipótesis i).....	76
4.1.2 Conclusiones hipótesis ii)	77
4.2 Futuras investigaciones posibles.....	78
REFERENCIAS	80
ANEXOS	84
Anexo A: Procedimiento del ensayo Loss On Ignition (LOI).....	84
Anexo B: Procedimiento del ensayo de penetración de iones cloruro	86
Anexo C: Procedimiento del ensayo de retracción autógena	91
Anexo D: Imágenes etapa experimental	94
Anexo E: Tablas de resultados	101
Anexo F: Extending internal curing to concrete mixtures with W/CM higher than 0.42	160

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades del agente de curado utilizado	25
Tabla 2: Diseño de mezclas (cantidades en kg/m^3 de hormigón)	26
Tabla 3: Resultado de ensayos y coeficientes de variación	29
Tabla 4: Comparación estadística de las propiedades del hormigón	39
Tabla 5: Propiedades del agente de curado utilizado	56
Tabla 6: Diseño de mezclas (cantidades en kg/m^3 de hormigón).....	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Desarrollo esquemático de cambios volumétricos no debidos a causas térmicas o pérdida de humedad con el ambiente (Jensen y Hansen, 2001).....	8
Figura 2: Efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión del hormigón (Kosmatka et al., 2002)	10
Figura 3: Clasificación de métodos de curado (Kovler y Jensen, 2007).....	12
Figura 4: Grado de hidratación a la edad de 90 días	30
Figura 5: W/CM efectiva según grado de hidratación alcanzado vs. W/CM inicial.....	33
Figura 6: Pérdida efectiva de agua según W/CM y tipo de curado.....	34
Figura 7: Resistencia a la compresión a la edad de 90 días	35
Figura 8: Permeabilidad a los iones cloruros a la edad de 90 días.....	37
Figura 9: Resistencia a la compresión a los 90 días con distintos porcentajes de reemplazo de puzolanas con y sin curado interno (W/CM=0.3).....	60
Figura 10: Permeabilidad a los iones cloruros a los 90 días de hormigones con distintos porcentajes de reemplazo de puzolanas con y sin curado interno (W/CM=0.3).....	62
Figura 11: Retracción autógena en el tiempo de hormigones con distintos porcentajes de reemplazo de puzolanas, con y sin curado interno (W/CM=0.3).....	64

Figura 12: Prensa utilizada en ensayo de resistencia a la compresión.....	94
Figura 13: Tipo de falla de probeta en ensayo de resistencia a la compresión	95
Figura 14: Ensayo de permeabilidad a los iones cloruros.....	96
Figura 15: Mortero metálico para moler hormigón.....	97
Figura 16: Hormigón en proceso de molienda.....	97
Figura 17: Colocación de crisoles en muflas	98
Figura 18: Muestra de hormigón sometida a temperaturas sobre 1000 °C	98
Figura 19: Marco rígido con deflectómetro digital para medir deformaciones	99
Figura 20: Deflectómetro digital de alta precisión.....	99
Figura 21: Muestras en cámara Binder para control de temperatura y humedad.....	100

RESUMEN

Esta investigación busca explicar los beneficios de aplicar curado interno (CI) en hormigones de distinta razón Agua/Materiales Cementicios (W/CM), con puzolanas naturales y distintas condiciones de curado.

El CI del hormigón consiste en utilizar un agente de curado capaz de absorber y almacenar agua, en forma previa al mezclado, para entregarla desde el interior de la mezcla durante el autosecado del hormigón, consecuencia de la hidratación del cemento. Este método ha sido estudiado con éxito en hormigones de baja W/CM, los cuales poseen baja permeabilidad, lo que dificulta el acceso hacia el interior de la mezcla de agua de curado desde el exterior.

Esta investigación busca responder dos interrogantes:

- ¿Qué beneficios tiene el curado interno en hormigones con razones W/CM relativamente altas?
- ¿Qué beneficios tiene el curado interno del hormigón para cementos con puzolanas naturales?

Respecto a la primera pregunta, las mezclas con cemento portland puro con curado interno mostraron un aumento en el grado de hidratación del cemento de un 16 % lo que produjo una disminución de la permeabilidad de un 30% y en un aumento de la resistencia a compresión de un 19%, condiciones requeridas para mejor desempeño mecánico y mayor durabilidad.

Respecto de la segunda pregunta, las mezclas con cementos portland puro y puzolanas naturales con la aplicación del curado interno mostraron una disminución significativa en la retracción autógena, cuyos valores están entre un 26% y 53% menor que aquellas muestras sin curado interno, minimizando el potencial de agrietamiento de estos hormigones.

Se puede concluir que el curado interno mejora la hidratación de los materiales cementicios obteniéndose una mayor resistencia, menor tendencia al agrietamiento y mayor durabilidad. Estas mejoras en propiedades permiten un mejor desempeño del material con similar contenido de materiales cementicios.

Palabras clave: hormigón, durabilidad, permeabilidad, puzolanas naturales, curado interno, agente de curado, hidratación, áridos livianos.

ABSTRACT

This research aims to explain the benefits of using internal curing of concrete in concrete mixtures with different Water-to-Cementitious Materials ratio (W/CM), with natural pozzolans and different curing conditions.

Internal curing of concrete involves using a curing agent capable of absorbing and storing water prior to mixing and deliver it from inside the mixture during the self-desiccation of concrete consequence of the cement hydration. This method has been successfully studied on low W/CM concretes that possess a very low permeability, which hinders access of the curing water from outside to the interior of mixture.

This research focus on two unknowns:

- What are the benefits of internal curing on concrete with relatively high W/CM?
- What are the benefits of internal curing on concrete having natural pozzolans?

With respect to the first question, internally cured mixtures fabricated mixtures fabricated with ordinary portland cement exhibit an increase in the degree of hydration by 16% which decreased permeability by 30% and increased compressive strength by 19%, conditions required for better mechanical performance and durability.

With respect to the second question, internally cured mixtures fabricated with ordinary portland cement and natural pozzolans exhibit a significant decrease in autogenous shrinkage, between 26% and 53% lower than those mixtures without internal curing, minimizing the potential for cracking.

Hence, internal curing improves hydration of the cementitious materials obtaining higher compressive strength, lower cracking tendency, and higher durability. These enhanced properties allow for better material performance with similar cementitious materials contents.

Keywords: concrete, durability, permeability, natural pozzolans, internal curing, curing agent, hydration, lightweight aggregates.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Estructura de tesis

El objetivo de esta tesis es presentar los resultados de la investigación de una forma precisa y concisa, de modo que los entendidos en el área puedan comprender el contexto de la investigación leyendo solamente el cuerpo principal de la tesis conformado por dos papers que se han escrito para publicar en distintas revistas de investigación en el rubro.

Con fines más explicativos de lo que es el hormigón y dar una guía de algunas problemáticas que presenta su uso, se parte con una introducción de lo que es este material de construcción para entregar información básica y mostrar la actual tecnología del hormigón. Luego se habla del cemento y su hidratación, proceso en que es vital el curado del hormigón (Mehta y Monteiro, 2006).

Con respecto al curado del hormigón, en esta introducción se menciona de que es lo que se busca al aplicar un curado eficaz, las limitantes que presenta el curado externo en hormigones poco permeables y como nace, a causa de esta limitante, el curado interno del hormigón y los beneficios que presenta su aplicación (Bentz, 2007).

La estructura de la tesis sigue con todo lo referido a la significancia de la investigación, es decir, se habla de qué es lo que se quiere responder, cuáles son los objetivos a cumplir y cuáles son las dos hipótesis principales que dan guía al procedimiento experimental.

Luego viene el cuerpo principal que son los dos papers, donde cada uno busca corroborar o descartar por separado cada una de las hipótesis principales. El primero es una traducción de un paper enviado a un journal internacional llamado Construction and Building Materials llamado “*EXTENDING INTERNAL CURING TO CONCRETE MIXTURES WITH W/CM HIGHER THAN 0.42*” que presenta los objetivos y resultados del primer objetivo de la investigación correspondiente a la

aplicación del curado interno en hormigones tradicionales como complemento del curado en obra, la versión original de este paper se adjunta en la parte final del anexo de esta tesis. El segundo es un paper que ha sido enviado a la Revista Ingeniería de Construcción de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica llamado *“INFLUENCIA DEL CURADO INTERNO EN LAS PROPIEDADES DE HORMIGONES CON CEMENTOS PORTLAND Y PUZOLANAS NATURALES”* que presenta los objetivos y resultados del segundo objetivo de la investigación correspondiente a investigar la mayor necesidad de curado interno en hormigones puzolánicos debido a la reacción secundaria de hidratación que presentan estos hormigones. Estos objetivos son detallados con mayor detalle en la sección correspondiente.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones finales de la investigación, entregando directrices de futuros estudios que se pueden realizar para complementar lo expuesto en esta tesis.

Se agrega un capítulo con toda la información anexa que se estima útil para comprender mejor los procedimientos realizados para llevar a cabo el desarrollo experimental de la investigación.

1.2 Aspectos generales

El hormigón es el material más utilizado en la construcción en todo el mundo; el único material consumido en mayor cantidad por el ser humano es el agua. Puede surgir la duda del por qué el hormigón es el elemento más utilizado en la construcción siendo que el acero es más fuerte y resistente que él, la respuesta se basa en 3 fundamentos (Mehta y Monteiro, 2006):

- 1 El hormigón posee gran resistencia a la presencia del agua, no así el acero común ni la madera.

- 2 El hormigón es un material fácil de moldear, lo que permite formar elementos de hormigón de variadas formas y tamaños.
- 3 Es usualmente el material más barato y más fácilmente disponible para trabajar.

Otras propiedades vitales del hormigón que lo hacen un material tan utilizado en la construcción son su bajo costo de mantención (no se corroe, no necesita tratamiento superficial y su resistencia aumenta con el tiempo), su resistencia al fuego y su resistencia a las cargas cíclicas entre otras.

Es vital conocer y entender las propiedades y comportamiento del hormigón con el fin de poder hacer un hormigón de mejor calidad y de mayor durabilidad para las estructuras que se fabriquen.

Para obtener un hormigón de buena calidad y alto desempeño (que satisfaga las condiciones requeridas de los distintos proyectos) no solamente es necesario tener materiales de calidad, sino que es esencial la forma en que se prepara y se mantiene la mezcla. Con respecto a la mantención del hormigón un aspecto muy relevante, probablemente el más importante, es el curado del hormigón que es vital desde las primeras horas después de la colocación para obtener la durabilidad y resistencia requerida, y un alto desempeño del mismo, durante la vida útil de la estructura. El curado del hormigón cumple un rol muy importante en minimizar la retracción a edades tempranas y el desecamiento de la pasta de cemento; un curado adecuado es vital para la calidad del hormigón. Todas las mezclas de hormigón con W/CM mayor a 0.42 contienen más agua que la requerida para la hidratación completa del cemento que contienen (Mindess et al., 2003), sin embargo, cualquier pérdida de agua por evaporación u otra forma limitará el máximo grado de hidratación obtenible por el cemento. Un buen curado significa que la evaporación debe ser prevenida. Un aspecto muy importante del curado, que muchas veces se olvida, es que no sólo debe prevenir la evaporación del agua de la mezcla y

mantener al hormigón a una adecuada humedad relativa interna, sino también minimizar la retracción del hormigón.

1.3 Componentes del hormigón

El hormigón es un material no homogéneo formado por agua, cemento, áridos, aire ocluido y también por aditivos químicos y/o adiciones minerales.

Gran porcentaje del hormigón está compuesto por áridos, variando entre un 65% y un 80% del volumen total; pero es el cemento el componente vital del hormigón.

Los áridos son el esqueleto del hormigón, existen áridos naturales y chancados y dependiendo del origen de estos variarán sus propiedades mecánicas (tamaño, resistencia intrínseca, absorción).

El agua es un componente esencial del hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido. En estado fresco otorga trabajabilidad necesaria para ser colocado, aumentando la lubricación entre las partículas y dándoles fluidez. En estado endurecido participa en el proceso de hidratación del cemento, por lo que debe ser evitada la pérdida de agua por evaporación u otro medio. También la dosis de agua afecta en la durabilidad y resistencia del hormigón; a menor cantidad de agua se obtiene un hormigón más resistente y más impermeable (Mindess et al., 2003).

El cemento mezclado con agua forma la pasta de cemento que trabaja como aglomerante, dándole cohesión y resistencia al hormigón en estado endurecido (Mehta y Monteiro, 2006).

Los aditivos y adiciones minerales son aquellos productos que se añaden el momento de mezclado del hormigón con el fin de modificar alguna de sus propiedades particulares en forma susceptible de ser prevista y controlada. En la actualidad se utilizan variados aditivos desde superplastificantes (brinda mayor trabajabilidad al hormigón) hasta retardadores de fraguado. Las adiciones

minerales se utilizan para obtener una construcción más sustentable en términos de costos del material (minimizar contenido de cemento reemplazándolo por materiales naturales) y fabricar un hormigón más verde con el ambiente utilizando desechos industriales, con el fin de ayudar a la preservación y tener una construcción de hormigón más amigable con el ambiente (Mehta y Monteiro, 2006). También es sabido que el utilizar adiciones minerales mejora las propiedades mecánicas del hormigón, el uso de puzolanas naturales produce una menor permeabilidad en el hormigón, una disminución en el ingreso de cloruros, menor reacción álcali-sílice y brinda una mayor resistencia a los sulfatos (Lea, 1971). En esta investigación se trabaja con puzolanas naturales para estudiar el efecto de adiciones minerales en el hormigón.

1.3.1 Propiedades del cemento y de las puzolanas

La función del cemento es llenar los huecos entre las partículas de áridos actuando como aglomerante. En estado fresco (la pasta de cemento) lubrica y da cohesión al hormigón. En estado endurecido es el responsable de proporcionar la resistencia al hormigón y de impermeabilizarlo, taponando los huecos entre los granos de árido, otorgándole mayor durabilidad durante las condiciones de servicio.

Estas propiedades dependen de la W/CM , del tipo de cemento y agentes cementicios secundarios y de las condiciones de curado.

El cemento portland puro es obtenido por la pulverización del clinker, el cual es producido por calcinación de calizas ($CaCO_3$) y arcillas (sílice), generando los silicatos hidráulicos de calcio; más yeso ($CaSO_4$) que actúa como retardador de fraguado. En la actualidad, para disminuir el consumo de cemento y utilizar un hormigón más sustentable y verde con el ambiente, se utilizan cementos portland mezclados con materiales naturales, como puzolanas, o residuos industriales, con el fin de minimizar las cantidades de emisión de CO_2 (Mehta y Monteiro, 2006). Las puzolanas, tal como otras adiciones minerales, son un material silíceo que

posee muy poca cantidad de valor cementicio, pero que (dividido muy finamente y en presencia de humedad) reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar componentes que poseen propiedades cementicias, esta reacción es secundaria y ocurre a mayor edad del hormigón (Mehta, 1987).

Los principales componentes del cemento son C_3S , que reacciona rápidamente con el agua para formar silicatos de calcio hidratados (CSH), libera gran calor de hidratación y proporciona gran resistencia a edades tempranas; C_2S , que reacciona con el agua de forma más lenta para formar los CSH, por lo que contribuye con la resistencia a mayor edad y permite que el calor de hidratación se disipe; C_3A , que reacciona muy rápido (libera mucho calor al hidratarse) y contribuye a la resistencia a edades tempranas, también reacciona con sulfatos en estado endurecido produciendo expansión y daño al hormigón; y C_4AF , que reacciona rápido con el agua, pero no produce mucho calor de hidratación ni resistencia.

1.3.2 Hidratación de los agentes cementicios

La hidratación empieza a ocurrir cuando el agua de mezclado entra en contacto con los materiales cementicios, originando reacciones químicas que dan origen a los silicatos de calcio hidratados, que le otorgan resistencia al hormigón, y otros productos de hidratación como hidróxido de calcio y monosulfatos. Una parte de esta agua de mezclado es adsorbida por la superficie de los productos de hidratación y el resto del agua queda en forma de solución en los poros capilares que se originan durante la hidratación debido a la retracción química. La retracción química es la reducción de volumen interno asociado a la reacción de hidratación en materiales cementicios debido a que el volumen de los productos de hidratación es menos que el volumen de los productos que los forman (Jensen y Hansen, 2001)

Los agentes cementicios obtienen el agua necesaria para promover su hidratación de los poros capilares, cuyo vaciado genera tensiones superficiales que, a nivel macroscópico, se traduce en reducciones volumétricas en un sistema cerrado, isotérmico y no sujeto a fuerzas externas conocidas como retracción autógena (Jensen y Hansen, 2001).

Se requiere de dos condiciones necesarias para obtener una hidratación completa de los materiales cementicios: debe haber espacio suficiente para la formación de los productos de hidratación y el agua necesaria para que ocurran las reacciones químicas. Teóricamente, en los hormigones con W/CM menor a 0.36 no hay espacio suficiente para la formación de dichos productos y en hormigones cuya W/CM se encuentra entre 0.36 y 0.42 se deberá suministrar agua adicional de curado para alcanza una hidratación del 100% (Mindess et al., 2003).

Las puzolanas naturales incrementan el requerimiento de agua debido a su característica estructura de microporos y su alta área superficial, además la necesitan en etapas posteriores. Con la cantidad de agua necesaria, el desempeño del hormigón en estado fresco y endurecido puede mejorar cuando se reemplaza una fracción de cemento portland por puzolanas naturales.

1.3.3 Retracción química y retracción autógena

Es fundamental distinguir entre volumen absoluto y aparente de una pasta de cemento endurecida (Jensen y Hansen, 2001):

- Un cambio en el volumen absoluto que no se debe a causas térmicas o pérdida de humedad con el ambiente significa retracción química.
- Un cambio en el volumen aparente que no se debe a causas térmicas o pérdida de humedad con el ambiente significa deformación autógena

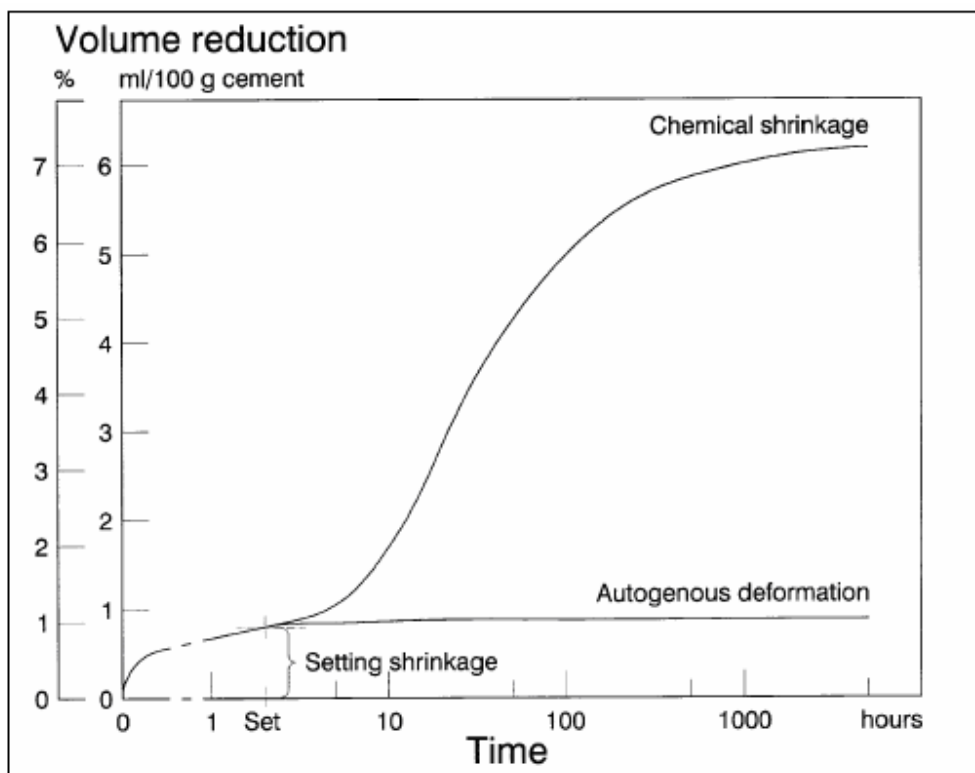


Figura 1: Desarrollo esquemático de cambios volumétricos no debidos a causas térmicas o pérdida de humedad con el ambiente (Jensen y Hansen, 2001)

De la Figura 1, podemos ver que la retracción química y la retracción autógena son idénticas hasta el tiempo 'Set' (tiempo final de fraguado), después de este punto la retracción química puede llegar a ser 50 veces mayor que la retracción autógena. Para entender esta diferencia es necesario conocer bien que significan estos términos mencionados anteriormente. Se debe considerar que existe una gran confusión con respecto a estos fenómenos, pues se usan diferentes términos para el mismo fenómeno y se utilizan el mismo término para diferentes fenómenos. A continuación se presentan las siguientes definiciones (Jensen y Hansen, 2001):

- **Retracción química:** reducción de volumen interno asociado a la reacción de hidratación en materiales cementicios

- *Deformación autógena*: la deformación del bulto de materiales cementicios en un sistema cerrado, isotérmico y no sujeto a fuerzas externas
- *Cambios autógenos en humedad relativa*: el cambio interno de humedad relativa del bulto de materiales cementicios en un sistema cerrado, isotérmico y no sujeto a fuerzas externas
- *Retracción por auto-secado*: deformación autógena en un sistema de materiales cementicios fraguado causado por retracción química
- *Auto-secado*: cambio autógeno de humedad relativa en un sistema de materiales cementicios fraguados causado por retracción química

1.4 Curado y su rol en la hidratación

El curado del hormigón cumple un rol muy importante en minimizar la retracción a edades tempranas y el desecamiento de la pasta de cemento, un curado adecuado es vital para la calidad del hormigón. Todas las mezclas de hormigón con W/CM mayor a 0.42 contienen más agua que la requerida para la hidratación completa del cemento que contienen, sin embargo, cualquier pérdida de agua por evaporación u otra forma limitará el máximo grado de hidratación obtenible por el cemento, un hormigón con W/CM menor a 0.42 requiere de agua de curado para alcanzar el grado de hidratación óptimo. Un buen curado significa que la evaporación debe ser prevenida o reducida. Un aspecto muy importante, que muchas veces se olvida, del curado es que no sólo debe prevenir la evaporación del agua de la mezcla y mantener al hormigón a una adecuada humedad relativa interna para promover la hidratación, sino también minimizar la retracción del hormigón.

Un curado bien aplicado y prolongado es vital en el desarrollo de resistencia y durabilidad del hormigón.

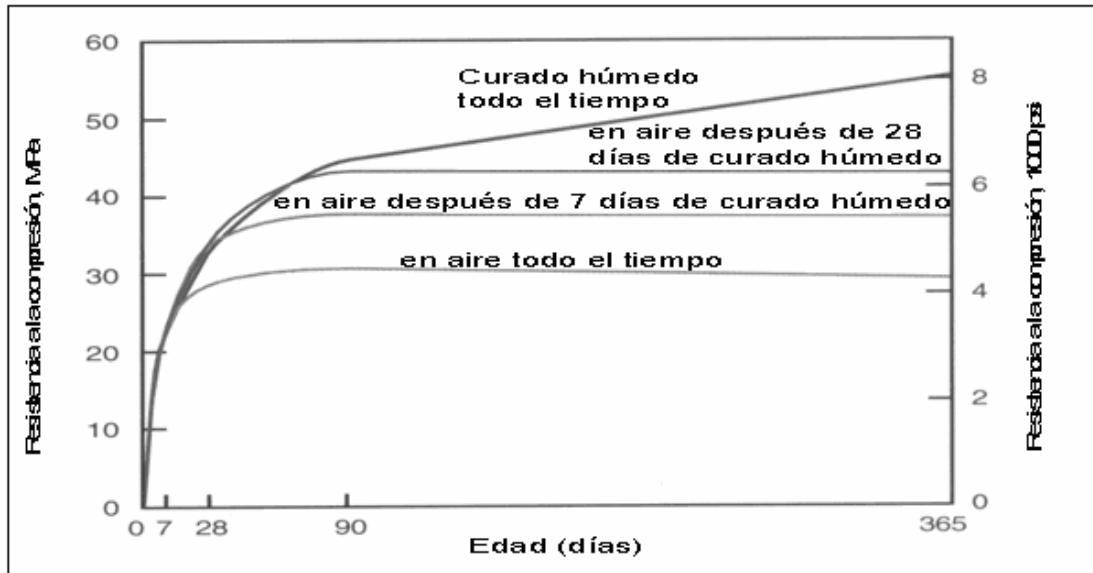


Figura 2: Efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión del hormigón (Kosmatka et al., 2002)

En la actualidad, los avances en la tecnología del hormigón los últimos años han llevado a utilizar hormigones con bajas W/CM, los cuales son propensos al agrietamiento a edades tempranas si no se toman las medidas adecuadas.

Los hormigones de baja W/CM tienen arraigado un problema denominado retracción autógena, fenómeno considerado como “el talón de Aquiles” de los hormigones de alta resistencia y alto desempeño. Este fenómeno (que no puede ser evitado) no es causado por efectos externos, como pérdida de humedad o cambios de temperatura, sino que es resultado de que el volumen absoluto de los productos de hidratación del cemento es menor que el volumen de cemento y agua antes de la hidratación (Jensen y Hansen, 2001).

La retracción autógena, que es la causa por la cual los hormigones con baja W/CM son propensos al agrietamiento a edades tempranas, es prácticamente imperceptible en hormigones con W/CM mayor a 0.4, pero a medida que la W/CM decrece

tiende a crecer y llega a ser un factor predominante (en hormigones con W/CM igual 0.3 puede representar la mitad de la retracción total).

Un curado eficiente debe ser capaz de prevenir la retracción autógena, impidiendo el autosecado y evitando el agrietamiento a edades tempranas del hormigón.

1.5 Curado interno

1.5.1 Orígenes del curado interno

Con la llegada de los hormigones de alto desempeño y alta resistencia es que nace el curado interno con la intención de minimizar la retracción autógena que intrínsecamente presentan estos hormigones de baja W/CM.

Los hormigones de baja W/CM presentan una permeabilidad muy baja, la cual es aún menor en presencia de cementos puzolánicos en el largo plazo, por lo que los métodos convencionales de curado (como inundado en agua) no son los suficientemente eficaces para combatir la retracción autógena en dichos hormigones. Los métodos convencionales de curado pueden eliminar la retracción autógena en pequeñas regiones solamente debido a que la penetración de agua de curado externo es muy limitada debido a la baja permeabilidad (Bentz, 2007) (López et. al., 2005).

Dadas estas limitaciones, se desarrollaron diferentes estrategias basadas en el curado interno del hormigón. Estas estrategias que se han investigado durante los últimos años tienen el objetivo de mitigar el autosecado y la retracción autógena, al mismo tiempo de tener y/o mantener reservas de agua para mitigar la retracción a largo plazo, lo que se debe tener en cuenta cuando se busca aplicar una tecnología de curado eficaz.

Entre los tipos de curado interno existentes, se puede utilizar el método de adicionar reservas de agua en el interior del hormigón, las que estarán disponibles para asistir a la hidratación de los materiales cementicios cuando el agua inicial

empiece a ser insuficiente debido a que ha sido utilizada y/o perdida al ambiente, lo que disminuye la humedad relativa interna de la mezcla (Kovler y Jensen, 2007). También existen métodos de sellado interno, es decir, impedir desde el interior que el agua se entregue al ambiente. Este método es útil para hormigones cuya agua de mezclado es suficiente para promover la hidratación completa del cemento (Kovler y Jensen, 2007).

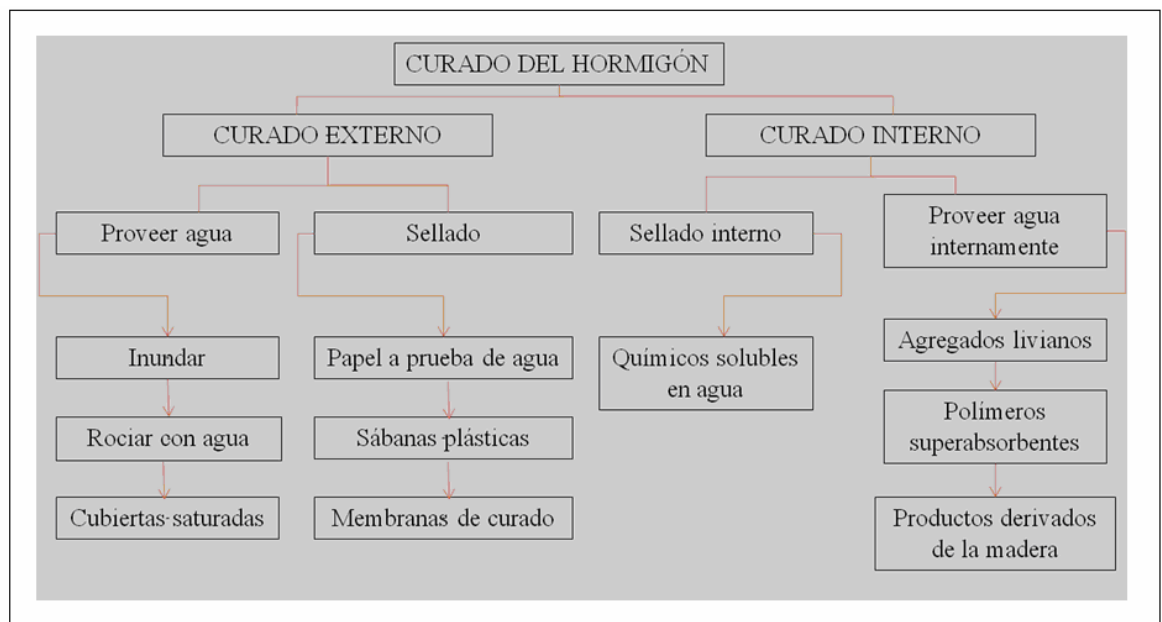


Figura 3: Clasificación de métodos de curado (Kovler y Jensen, 2007)

En la actualidad se ha visto una tendencia a usar cementos de menor finura, lo que conlleva a una disminución de la permeabilidad a edades tempranas, lo que dificulta la entrada de agua desde el exterior, dificultando el trabajo del curado externo y haciendo más necesaria la complementación con curado interno.

1.5.2 Resultados del curado interno

La durabilidad del hormigón depende de varias propiedades, entre ellas, la permeabilidad, el grado de hidratación, la retracción, la resistencia de la pasta y de la interfase agregado-pasta y la presencia de microgrietas (Mehta y Monteiro, 2006). Todas estas propiedades se pueden mejorar a través de un curado eficaz, ya sea interno o externo (López et. al., 2005).

Se ha demostrado que mediante un curado interno eficaz se disminuye la permeabilidad del hormigón, lo que hace más difícil la penetración de agentes nocivos al interior del hormigón, lográndose un aumento de la durabilidad. Un estudio sobre permeabilidad a iones cloruro en hormigones de baja W/CM (Thomas, 2006) mostró que la permeabilidad de aquellas mezclas que utilizaron agregado liviano como agente de curado interno presentaban un 39% y 29% de la permeabilidad de la mezcla sin agregado liviano a la edad 1 y 3 años, respectivamente.

Hormigones que presentan un curado más eficiente tienden a presentar menor retracción y agrietamiento. Se ha mostrado que en hormigones de W/CM=0.23 curados internamente con pizarra expandida, se observa menor retracción en comparación con un hormigón con agregado normal (López et al, 2008).

II. SIGNIFICANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Preguntas relevantes

Muchos autores han investigado y probado los beneficios de utilizar el curado interno en hormigones de baja permeabilidad y de baja W/CM, pero no se ha explorado el potencial que se puede obtener de este método de curado como un método adicional para el curado tradicional en hormigones comúnmente utilizados en condiciones de obra.

Debido al alto desarrollo de la tecnología en la construcción, los proyectos se desarrollan cada vez con mayor rapidez, esto atenta con la aplicación de un método de curado tradicional eficiente y generalmente no permite que el curado sea aplicado por un tiempo adecuado, es por ello que entre los temas de esta investigación se busca mostrar las ventajas de aplicar curado interno como complemento del hormigón tradicional, en obra muchas veces pobre, y cómo ayuda a conseguir las condiciones óptimas del hormigón que se deberían tener con un curado realizado correctamente.

Por otro lado, el consumo de cemento pasó de 2 millones de toneladas en 1990 a casi 4.5 millones en el año 2005 solamente en Chile. Las emisiones de CO₂, que es principal gas de invernadero producido por el consumo de energía fósil del hombre, proveniente de la fabricación del cemento corresponden al cuarto mayor en orden de magnitud, siendo superado solamente por el petróleo, carbón y gas natural. Las emisiones totales de CO₂ han tenido un crecimiento inmenso, incrementando el valor de las emisiones de 1.000 a 8.000 millones de toneladas entre los años 1950 y 2005.

En la actualidad es esencial tomar medidas que disminuyan estas emisiones para proteger y cuidar el medioambiente, el uso de puzolanas naturales en la fabricación del hormigón es una gran ayuda para disminuir el consumo de cemento y para tener una construcción más sustentable y amigable con el medioambiente.

Cuando se meten variables en un proceso es importante mantenerlo controlado; en el caso de la adición de puzolanas a un hormigón como agente cementicios la mejor forma de mantenerlo controlado es mediante un curado eficaz y prolongado, con el fin de mantener una humedad interna alta en el hormigón y proveer agua en la etapa que la puzolana quiere reaccionar con el hidróxido de calcio, permitiendo formar los productos necesarios de hidratación y obtener un hormigón más durable y de mejor calidad.

El curado interno se muestra como un buen candidato para lograr estos objetivos, pues actúa como un reservorio de agua que la entrega a medida que los agentes cementicios la van requiriendo para su hidratación por gradientes de humedad, se va entregando progresivamente lo que permite tener agua de curado durante un tiempo prolongado y ayuda a mantener alta la humedad relativa interna del hormigón. Esta condición es mucho más favorable para hormigones de baja W/CM, de baja permeabilidad, porque dificulta el ingreso de agua de curado desde el exterior.

Es por ello que el otro lado de esta investigación se enfoca en analizar los beneficios de aplicar curado interno a un hormigón de W/CM igual a 0.3 fabricado con cemento portland con adiciones, en distintas proporciones, de puzolanas naturales en la presencia de un buen curado externo.

Hay dos hechos a considerar con respecto a los objetivos de la investigación:

1. Los hormigones de W/CM mayor a 0.42 contienen agua suficiente para alcanzar una hidratación completa del cemento en condiciones de sellado óptima (esto implica que con un curado externo eficaz se obtendría la hidratación máxima del cemento). Sin embargo, lo que ocurre en obra es que las técnicas de curado son en ocasiones insuficientes y puede que no se alcance una hidratación óptima, teniendo directamente repercusión en la durabilidad.

2. Los hormigones con adiciones puzolánicas naturales presentan reacciones químicas secundarias, es decir, necesitan agua en etapas posteriores, la cual ya no puede existir si el agua de la mezcla es poca, por lo que no se producirán los productos de hidratación necesarios para obtener un hormigón de alto desempeño y calidad.

Bajo estos criterios es que se busca mostrar la utilidad de aplicar curado interno como complemento al curado tradicional del hormigón en obra para solucionar problemáticas grandes de la industria del hormigón en la actualidad. La utilización de hormigones alta resistencia y alto desempeño se ven muchas veces obligados a utilizar W/CM muy bajas, produciendo un hormigón muy impermeable, muy difícil de curar externamente y con una necesidad de curado crítica. Además, la adición de puzolanas naturales en el hormigón para construir un hormigón más sustentable y amigable con el ambiente requiere de un curado eficaz y, también, más prolongado, ambas características de un curado interno bien aplicado.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo i)

A través de la aplicación de curado interno a hormigones con distintas W/CM utilizadas con mayor frecuencia en el mercado de la construcción se pretende obtener mejoras en las propiedades mecánicas del hormigón, disminuir el potencial de agrietamiento y promover una mayor durabilidad (consecuencia de un hormigón menos permeable). Se espera que el curado interno amortigüe, en parte importante, el daño de aplicar un curado externo deficiente.

2.2.2 Objetivo ii)

También se busca mostrar la mayor necesidad de curado interno ante la presencia de puzolanas naturales (agentes cementicios secundarios) para hormigones de baja W/CM y muy impermeables, mejorando las propiedades del hormigón ante la presencia de un buen y prolongado curado interno.

2.3 Hipótesis

2.3.1 Hipótesis i)

El curado interno es efectivo para hormigones con W/CM hasta 0.5.

En condiciones de sellado (no hay pérdidas de agua hacia el ambiente), los hormigones con W/CM mayor que 0.42 teóricamente alcanzan una hidratación del 100% de los agentes cementicios. En condiciones no selladas y de humedad relativa inferior al 100%, existen pérdidas de agua hacia el ambiente, las que provocan que el agua disponible para la hidratación no sea suficiente. Parte de esta agua es reemplazada por el agua absorbida en el agente de curado, mejorando la hidratación de los agentes cementicios. Se estima que el remanente de agua disponible para la hidratación (agua total menos agua entregada al ambiente) es insuficiente aún para mezclas con W/CM igual a 0.5; por lo que un hormigón con agua de curado interno la mejora.

2.3.2 Hipótesis ii)

Cuando se utilizan materiales cementicios secundarios como puzolanas naturales el curado interno es aún más necesario que cuando se utiliza cemento portland puro.

Los materiales cementicios secundarios forman productos de hidratación a edades más tardías que el cemento portland puro, por lo que tienen una demanda de agua posterior. En hormigones con curado por poco tiempo, las pérdidas de agua pueden ser muy significativas y puede que el agua necesaria para formar estos productos de hidratación no esté disponible cuando sea necesaria. Este efecto se puede mitigar con la aplicación del curado interno.

III. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

3.1 Extendiendo el curado interno a mezclas de hormigón con W/CM mayor a 0.42

3.1.1 Resumen

El curado interno (CI) ha demostrado ser un método efectivo en hormigones de baja W/CM - baja permeabilidad. Esta investigación aplica el CI en mezclas de hormigón cuya W/CM es mayor a 0.42 los cuales teóricamente contienen agua suficiente para alcanzar una hidratación completa. Sin embargo, el curado en obra puede ser insuficiente para asegurar un alto grado de hidratación produciendo efectos perjudiciales en la resistencia y durabilidad. El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto del CI como un complemento al curado tradicional en hormigones con W/CM relativamente alta.

Se midió el grado de hidratación, la resistencia a la compresión y la permeabilidad bajo pobres condiciones de curado externo en presencia y ausencia de CI. Incluso bajo estas condiciones duras de curado, las mezclas con CI mostraron un grado de hidratación 16% mayor que aquellas sin CI, lo que se manifestó en un aumento del 19% en la resistencia a la compresión y en una disminución del 30% en la permeabilidad que sus contrapartes sin CI.

Palabras claves: curado, permeabilidad, durabilidad, hidratación, agregado liviano, agente de curado.

3.1.2 Introducción

Sabido es que el curado del hormigón es vital desde las primeras horas después de la colocación para obtener la durabilidad y resistencia requerida, y un alto desempeño del mismo, durante la vida útil de la estructura. Por ello se requiere que se realice un curado eficiente en obra, con el fin de maximizar la hidratación de los agentes cementicios y reducir problemas de agrietamiento originados por la retracción.

En obra muchas veces se realiza un curado deficiente debido a la complicación que representa curar ciertos elementos estructurales, como muros y pilares, además del apuro que existe en la construcción que atenta contra la aplicación adecuada del curado.

3.1.2.1 Hidratación de materiales cementicios

La hidratación ocurre cuando los materiales cementicios entran en contacto con el agua, originándose productos de hidratación, como los silicatos de calcio hidratados, que le otorgan gran parte de la resistencia al hormigón, y otros como el hidróxido de calcio, la etringita y el monosulfato (Mehta y Monteiro, 2006). Del agua que no reacciona químicamente con los materiales cementicios, una parte es adsorbida por la superficie de los productos de hidratación, otra queda retenida en los intersticios intercapas de los silicatos de calcio hidratado y el resto del agua queda en forma de solución en los poros capilares que se originan durante la hidratación debido a la retracción química (Mehta y Monteiro, 2006). La retracción química es la reducción de volumen interno de la pasta de cemento hidratada, debido a que el volumen de los productos de hidratación es menor que el volumen de los productos que la forman (Jensen y Hansen, 2001).

Los agentes cementicios obtienen el agua necesaria para promover su hidratación de los poros capilares, cuyo vaciado genera tensiones capilares que, a nivel

macroscópico, se traducen en reducciones volumétricas en un sistema cerrado, isotérmico y no sujeto a fuerzas externas conocidas como retracción autógena (Jensen y Hansen, 2001).

Se requieren de dos condiciones necesarias para obtener una hidratación completa de los materiales cementicios: i) debe haber espacio suficiente para la formación de los productos de hidratación y ii) debe haber agua suficiente. En los hormigones con W/CM menor a 0.36 no hay espacio suficiente para la formación de dichos productos, mientras que en hormigones cuya W/CM se encuentra entre 0.36 y 0.42 se deberá administrar agua adicional de curado para alcanzar una hidratación óptima (Mindess et al., 2003) (Powers, 1960).

3.1.2.2 Curado del hormigón

El curado del hormigón cumple un rol muy importante en promover la hidratación, minimizar la retracción a edades tempranas y el desecamiento de la pasta de cemento. Un curado adecuado es vital para la calidad del hormigón. Todas las mezclas de hormigón con W/CM mayor a 0.42 contienen más agua que la teórica requerida para la hidratación completa del cemento que contienen. Sin embargo, cualquier pérdida de agua por evaporación limitará el máximo grado de hidratación a obtener por el cemento. Un hormigón con W/CM menor a 0.42 requiere de agua de curado adicional para alcanzar el grado de hidratación óptimo. Un aspecto muy importante del curado, pero que muchas veces se olvida, es que no sólo debe prevenir la evaporación del agua de la mezcla y mantener al hormigón a una adecuada humedad relativa interna y temperatura, sino también minimizar la retracción del hormigón.

3.1.2.3 Aplicación del curado interno a hormigones tradicionales

El curado interno es un método de curado estudiado y aplicado para hormigones de baja W/CM, donde se dificulta el ingreso de agua de curado externo por su baja permeabilidad (Bentz, 2000). Esta técnica de curado consiste en adicionar reservas de agua en el interior del hormigón, las que estarán disponibles para asistir a la hidratación de los materiales cementicios cuando el agua inicial empiece a ser insuficiente debido a que ha sido utilizada para la hidratación y/o perdida al ambiente, disminuyéndose la humedad relativa interna de la mezcla (Mehta y Monteiro, 2006).

En la actualidad, se ha visto una tendencia a usar cementos de menor finura, lo que conlleva a una disminución de la permeabilidad a edades tempranas, dificultándose la entrada de agua desde el exterior, la eficacia del curado externo y haciendo más necesaria el aporte complementario del curado interno (Mehta y Monteiro, 2006).

3.1.2.4 Resultados de un curado efectivo en las propiedades del hormigón

La durabilidad del hormigón depende de varias propiedades, entre ellas, la permeabilidad, el grado de hidratación, la retracción, la resistencia de la pasta y de la interfase agregado-pasta y la presencia de microgrietas (Mehta y Monteiro, 2006). Todas estas propiedades se pueden mejorar a través de un curado eficaz, ya sea interno o externo (López et. al., 2005).

Se ha demostrado que mediante un curado interno eficaz se disminuye la permeabilidad del hormigón, lo que hace más difícil la penetración de agentes nocivos al interior del hormigón, lográndose un aumento de la durabilidad. Un estudio sobre permeabilidad a iones cloruro en hormigones de baja W/CM (Thomas, 2006) mostró que la permeabilidad de aquellas mezclas que utilizaron agregado liviano como agente de curado interno presentaban un 39% y 29% de la

permeabilidad de la mezcla sin agregado liviano a la edad 1 y 3 años, respectivamente.

Hormigones que presentan un curado más eficiente tienden a presentar menor retracción y agrietamiento. Se ha mostrado que en hormigones de $W/CM=0.23$ curados internamente con pizarra expandida, se observa menor retracción en comparación con un hormigón con agregado normal (López et al, 2008).

3.1.3 Significancia de la investigación

En la actualidad los proyectos requieren ser abierto a servicio en tiempo más cortos cada vez, esto atenta con la implementación de métodos cuidadosos y efectivos de curado tradicional por un tiempo prolongado.

Hay muchos artículos que muestran los beneficios de usar curado interno en hormigones de baja permeabilidad y baja W/CM , pero no es lo mismo en hormigones con W/CM mayor a 0.42, lo que aún no se ha estudiado.

La motivación de esta investigación es aplicar el curado interno como complemento al tradicional curado externo en hormigones con W/CM mayor a 0.40 para medir las mejoras en sus propiedades cuando el curado externo no es suficiente. Se espera que el curado interno mantenga una humedad relativa interna alta entregando agua a los materiales cementicios promoviendo la hidratación.

3.1.4 Diseño experimental

Un total de diez mezclas de hormigón fueron fabricadas con cinco W/CM diferentes y para cada una de ellas se hizo una mezcla con curado interno y otra sin curado interno.

El volumen de pasta de cemento y de agregados se mantuvo constante para todas las mezclas de hormigón.

Se colocó hormigón en seis moldes cilíndricos de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro para cada mezcla. Todos los especímenes fueron desmoldados 24 horas después de su colocación y puestos en una cámara a 23 °C y 50% de humedad relativa hasta la edad de ensayo. Todos los ensayos fueron realizados a la edad de 90 días.

3.1.4.1 Agente de curado utilizado

Aunque existen varios agentes de curado potencialmente útiles para implementar el curado interno, esta investigación considera el uso de arcilla expandida (un agregado liviano artificial) en fracción bajo 5 mm ya que ha sido aplicado exitosamente en mezclas de baja W/CM previamente (Jensen y Lura, 2006).

Este agente de curado fue escogido por su capacidad de absorción, desorción y por su tamaño de partículas que permite una mayor distribución del mismo dentro de la mezcla de hormigón y, por lo tanto, optimizar la eficacia del curado interno minimizando la distancia de transporte de agua la cual está limitada (Bentz, 2007).

Las propiedades de la arcilla expandida utilizada se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1: Propiedades del agente de curado utilizado

	Arcilla expandida arena
Rango de tamaño (mm)	0.08 – 5
Absorción a 1 día	21.2%
Absorción a 3 días	28.5%
Absorción a 21 días	30.6%
Absorción a 32 días	30.8%
Densidad real seca (kg/m³)	1.653
Densidad real saturada con superficie seca (SSS) (kg/m³)	1.920
Porosidad¹	41%
Desorción² (%/días x 10⁵)	10.1

1: La porosimetría fue medida mediante el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)

2: La desorción fue medida monitoreando la cantidad de agua perdida por el agregado liviano – inicialmente sumergido en agua por 3 días – mientras se mantenía a una humedad relativa de 97%. El valor entregado es la pendiente de agua entregada al ambiente versus tiempo en %/días x 10⁵.

3.1.4.2 Diseño de mezclas

El diseño de mezcla de los hormigones usado en este estudio y sus propiedades frescas se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2: Diseño de mezclas (cantidades en kg/m³ de hormigón)

Constituyentes	CCI ¹	SCI ²	CCI	SCI	CCI	SCI	CCI	SCI	CCI	SCI
W/CM	0.400		0.425		0.450		0.475		0.500	
Agua	161		166		170		173		177	
Cemento ³	403		389		377		364		354	
Agregado grueso ⁴	841		841		841		841		841	
Agregado fino ⁵	563	1028	563	1028	563	1028	563	1028	563	1028
Arcilla expandida	331	-	331	-	331	-	331	-	331	-
Peso unitario fresco (kg/m ³)	2263	2464	2237	2434	2278	2449	2287	2463	2288	2432
Cono (cm)	1.0	1.5	1.0	2.0	1.5	1.0	2.5	2.5	2.5	4.0

1: CCI: Curado interno aplicado; 2: SCI: Curado interno no aplicado; 3: Cemento portland corriente;

4: Agregado silíceo tamaño máximo 10-mm; 5: Agregado silíceo tamaño máximo 5-mm.

En la investigación se partió con W/CM de 0.4 hasta 0.5 con el fin de tener datos en el período de transición del límite de 0.42 para hidratación máxima.

Las mezclas fueron fabricadas usando un 38% y un 31% de volumen de agregado fino y grueso en todas las mezclas respectivamente. El aire atrapado fue asumido como un 2% del volumen total. No se consideró el uso de aditivos reductores de agua para evitar posibles efectos secundarios en las propiedades de interés. Como las mezclas contenían diferente cantidades de agua de mezclado, la trabajabilidad medida con el ensayo de cono presentó valores que variaron entre 1 y 4 cm, sin

embargo, todas las mezclas pudieron ser bien compactadas mediante un vibrador de inmersión.

Todas las mezclas con curado interno tenían la misma cantidad de agua de curado interno (81 kg/m³ de hormigón). El valor corresponde a la cantidad de agua perdida durante el período de un año de secado en una mezcla de hormigón de W/CM de 0.6 (López, 2005). Esta agua está contenida en la arcilla expandida arena, la cual es reemplazada por agregado normal fino. La arcilla expandida se usó en condiciones pre-humedecidas, lo que se logró sumergiendo el agregado liviano en agua durante tres días después de haberlo secado en un horno (H=0%). Antes de mezclas, el agregado liviano fue removido se dejó drenar y se secó su superficie con toallas de papel para obtener una condición de superficie saturada seca. Esto fue posible debido a los volúmenes relativamente bajos que se mezclaban. En aplicaciones industriales, la humedad necesita ser medida para poder ajustar la cantidad de agua de mezclado para no afectar la W/CM.

3.1.4.3 Ensayos realizados

En todas las mezclas de hormigón se midió el grado de hidratación (LOI, loss on ignition), resistencia a la compresión y permeabilidad a los iones cloruros. La edad de ensayo fue 90 días con el fin medir las propiedades en una edad avanzada del hormigón endurecido.

Se obtuvieron 4 muestras de 4 probetas distintas de hormigón las cuales fueron ensayadas para medir el grado de hidratación. Las muestras fueron obtenidas triturando el hormigón usando un mortero metálico. Aproximadamente, se tomaron 30 gr de hormigón triturado que pasa el tamiz de 5 mm y se colocaron en crisoles cerámicos resistentes a altas temperaturas. Primero, las muestras fueron colocadas a 105 °C durante 24 horas, con el fin de remover toda el agua evaporable (agua que no está unida químicamente). Luego, se colocaron las muestras por un período de 3

horas mínimo a 1100 °C. Se debe señalar que a temperaturas mayores a 1000 °C los enlaces químicos se rompen y el agua que ha reaccionado con el cemento para formar los productos de hidratación es removida (conocida como agua química). Conociendo la pérdida de masa que hay entre 105 y 1100 °C y la pérdida de masa por ignición del cemento no hidratado y de los agregados (normales y livianos) se puede calcular el grado de hidratación alcanzado. En estos cálculos se utilizó el supuesto de que el agua no evaporable contenida para la hidratación completa del cemento es de 0.23 gr de agua por 1 gr de cemento (Bentz y Hansen, 2010). Este valor puede variar con el tipo de cemento, pero para los propósitos comparativos requeridos en esta investigación el valor asumido es adecuado.

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado a la edad de 90 días según norma ASTM C39. Para cada W/CM se ensayaron 4 especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de alto.

La permeabilidad a los iones cloruros fue medida según norma ASTM C1202 en dos especímenes de forma de disco de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura. El test consiste en colocar los extremos planos de las muestras en dos celdas que contienen diferentes soluciones, una celda contiene solución al 3% de NaCl (la cual está conectada al polo negativo) y la otra contiene una solución de 0.3 N de NaOH (la cual está conectada al polo positivo). Los dos polos son conectados a 60 volts mediante una fuente de poder y la intensidad de corriente que atraviesa las muestras es medida cada 5 minutos por un lapso de 6 horas. La permeabilidad a los iones cloruros es expresada como la carga que atraviesa durante las 6 horas a través de la muestra.

3.1.5 Resultado de ensayos y análisis

La tabla 3 presenta los resultados del grado de hidratación, resistencia a la compresión y permeabilidad a los iones cloruros de las mezclas con y sin curado interno para las distintas W/CM:

Tabla 3: Resultado de ensayos y coeficientes de variación

W/CM	Condición de curado	Grado de hidratación		Resistencia a la compresión		Permeabilidad a los iones cloruros	
		%	CV ¹	MPa	CV	Coulombs	CV
0.4	CCI	62%	7.3%	74.0	5.6%	1671	5.9%
	SCI	47%	18.4%	67.5	8.7%	1768	23.8%
0.425	CCI	70%	16.6%	61.8	6.6%	2846	2.1%
	SCI	48%	11.1%	50.8	7.9%	3290	1.8%
0.45	CCI	66%	16.2%	66.8	1.0%	1587	0.6%
	SCI	51%	15.9%	49.1	7.3%	3237	9.3%
0.475	CCI	69%	2.5%	55.4	7.5%	2649	5.5%
	SCI	59%	12.0%	47.5	11.0%	3131	0.8%
0.5	CCI	67%	7.4%	61.9	3.2%	1625	9.5%
	SCI	50%	13.7%	55.0	3.2%	3342	7.3%
Promedio	CCI	67%	10.0%	64.0	4.8%	2076	4.7%
	SCI	51%	14.2%	54.0	7.6%	2954	8.6%

1: Coeficiente de variación (desviación estándar dividida valor promedio)

3.1.5.1 Grado de hidratación

La Figura 4 presenta los resultados del ensayo del grado de hidratación para las diez mezclas bajo investigación:

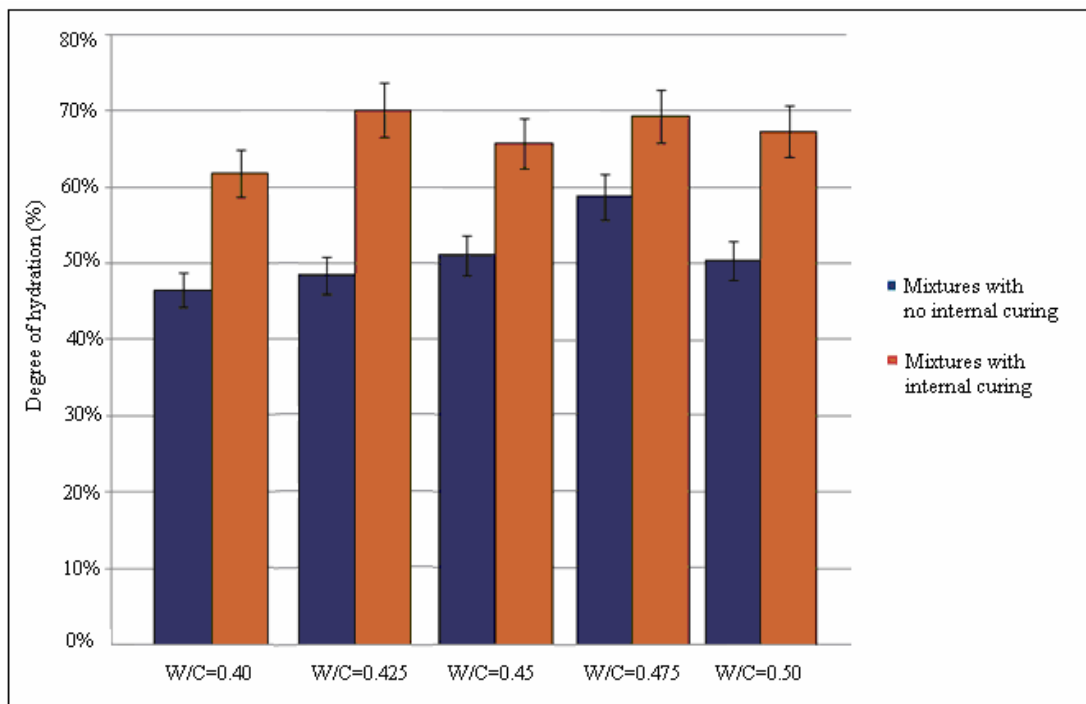


Figura 4: Grado de hidratación a la edad de 90 días

Teóricamente, se puede alcanzar una hidratación del 100% del cemento en todas las mezclas con W/CM mayor a 0.36. Esto solamente bajo condiciones óptimas y prolongadas de curado (Bentz et. al., 2005).

Como se muestra en la Figura 4, ninguna de las mezclas alcanzó un valor de hidratación del 100% a pesar que algunas tenían W/CM mayor a 0.42. Esto era esperable dado que las condiciones de curado no eran óptimas y el tiempo de curado fue sólo 90 días.

De la Figura 4 se puede concluir que todas las mezclas con curado interno mejoraron el grado de hidratación en comparación con las que no presentaron el uso de esta técnica de curado. El aumento mayor en el grado de hidratación fue obtenido para la mezcla de W/CM igual a 0.425 mientras que el menor fue para la mezcla de W/CM igual 0.475, valores que corresponden a 22% y 10% respectivamente.

Es interesante notar que bajo pobres condiciones de curado, como las que se utilizó en esta parte de la investigación, el grado de hidratación no aumentó significativamente a medida que la W/CM aumenta. Esto es válido para ambos casos: con y sin curado interno. Esto se puede deber que a medida que la W/CM aumenta, la estructura de poros de la pasta de cemento está más interconectada, tal como muestran los resultados del ensayo de permeabilidad a los iones cloruros, mostrados posteriormente. Este aumento en la permeabilidad sugiere un posible incremento en el secado del hormigón con el consecuente impacto en la hidratación.

Un estudio previo (Feng et. al., 2004) midió el grado de hidratación en mezclas con cemento portland tipo I con W/CM de 0.4 a la edad de 90 días bajo un curado sellado a 20 °C y 100% de humedad relativa alcanzando un valor de 70.2%. Los valores de la Tabla 3 muestran que las mezclas con W/CM de 0.4 sin curado interno alcanzaron un grado de hidratación de 47% cuando se mantuvieron a 50% de humedad relativa y sin sellado de las muestras. Esto sugiere que las pobres condiciones de curado usadas en esta investigación puede haber causado una caída en el grado de hidratación de 70 a 47% (23% de caída en el grado de hidratación) cuando el curado interno no fue aplicado. Sin embargo, las mezclas con curado interno alcanzaron un grado de hidratación de 62% para W/CM de 0.4, esto sugiere que el curado interno puede reducir los efectos negativos del secado externo (solamente un 8% de caída en el grado de hidratación).

Esto implica que el curado interno funciona como un protector/asistidor para la hidratación hasta los 90 días, incluso bajo condiciones de secado. El curado interno

a probado ser un complemento potente al curado tradicional, especialmente cuando el último no es bien aplicado.

Como parte del agua inicial contenida en la pasta cemento es entregada al ambiente durante el período de secado de 90 días de las muestras, la W/CM efectiva de cada mezcla puede ser estimada con el fin de cuantificar el impacto del secado en las muestras con y sin curado interno.

Para estimar el agua usada real para la hidratación de cada mezcla de hormigón, se calculó la porosidad inicial y la W/CM efectiva basada en el modelo desarrollado por Powers (Jensen, 2007):

$$p = \frac{W / CM}{W / CM + \rho_w / \rho_c} \quad (3.1)$$

$$\alpha_{m\acute{a}x} = \frac{p}{1.1(1 - p)} \quad (3.2)$$

Donde:

p: porosidad inicial

W/CM: razón agua/cemento en masa

ρ_w : densidad del agua

ρ_c : densidad del cemento

$\alpha_{m\acute{a}x}$: grado de hidratación máximo que puede alcanzar el hormigón

Asumiendo que el máximo grado de hidratación alcanzable se logró después de los 90 días de edad cuando se almacena a 50% de humedad relativa, el modelo anterior puede ser usado para comparar con los datos del grado de hidratación medido experimentalmente en la Tabla 3.

Una “porosidad inicial experimental” puede ser estimada usando el grado de hidratación experimental y la ecuación 2. Luego, la W/CM efectiva puede ser calculada usando la porosidad inicial experimental calculada y la ecuación 1.

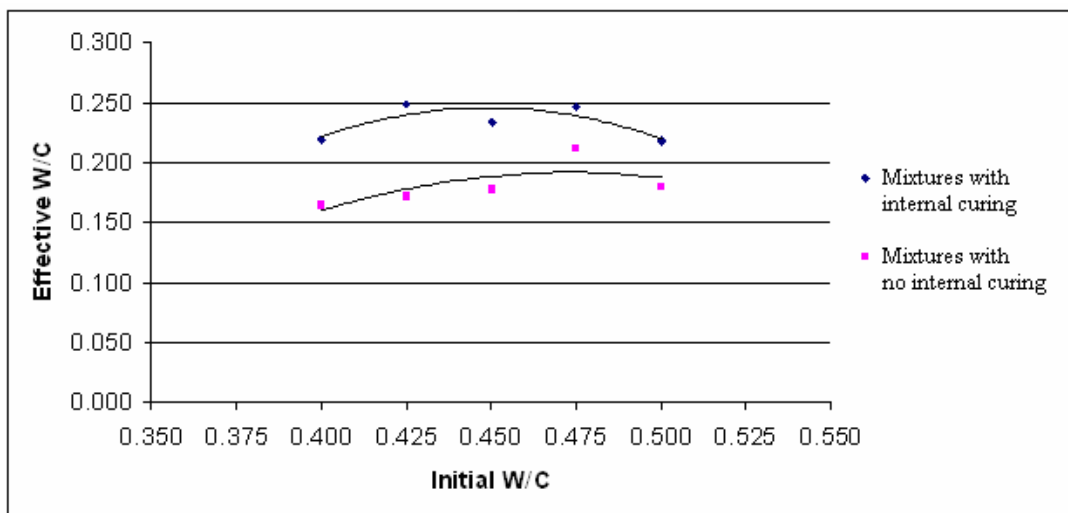


Figura 5: W/CM efectiva según grado de hidratación alcanzado vs. W/CM inicial

La Figura 5 muestra la W/CM inicial versus la W/CM efectiva requerida para alcanzar el grado de hidratación obtenido mediante el ensayo LOI si no hubiesen intercambios de agua con el ambiente (curado sellado). Se puede notar que para cada W/CM las mezclas con curado interno mostraron una W/CM efectiva mayor que sus contrapartes sin curado interno. Es decir, las mezclas con curado interno en condiciones de secado por 90 días tuvieron un comportamiento similar a mezclas selladas con W/CM entre 0.22 y 0.25 mientras las mezclas sin curado interno bajo las mismas condiciones se comportaron similarmente a mezclas selladas con W/CM entre 0.17 y 0.21.

La Figura 6 muestra la cantidad efectivamente perdida de agua por cada mezcla calculada como la diferencia entre la cantidad inicial de agua libre (ver Tabla 2) y

el agua efectiva (calculada como la W/CM efectiva multiplicada por la cantidad de cemento).

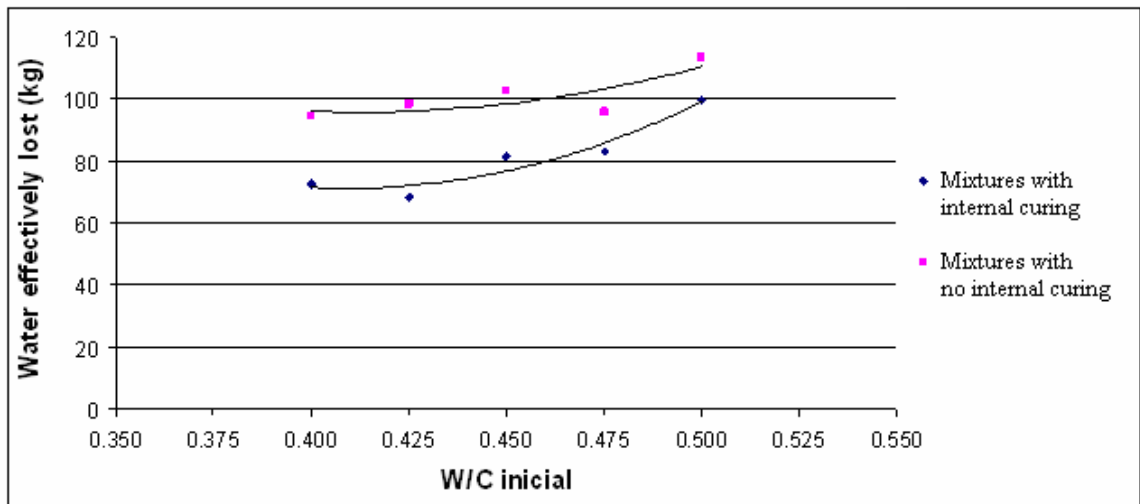


Figura 6: Pérdida efectiva de agua según W/CM y tipo de curado

La Figura 6 sugiere que, a pesar de la W/CM inicial, las mezclas con curado interno mostraron una pérdida efectiva de agua menor que las mezclas sin curado interno; en promedio, las mezclas con curado interno tuvieron una pérdida efectiva de agua de 19.84 kg menos que sus contrapartes sin curado interno. Esto puede implicar que aunque ambos tipos de mezclas (con y sin curado interno) fueron almacenadas a 50% de humedad relativa, la pasta de cemento de aquellas con curado interno se vio menos afectada por el secado que la pasta de cemento de aquellas mezclas sin curado interno. Este efecto menor de secado en las mezclas con curado interno se cree que se debe a la presencia del agua almacenada internamente dentro del agregado liviano. Como la pasta de cemento pierde agua al ambiente, “la nueva” agua migra desde del agregado liviano hacia la pasta de cemento para asistir la hidratación.

La Figura 6 también sugiere que la cantidad de agua efectivamente perdida se incrementa a medida que la W/CM es mayor. Es decir, las mezclas con una porosidad inicial mayor (mayor W/CM inicial) muestran una cantidad mayor de agua efectivamente perdida, mostrando que pueden verse más afectadas por el secado.

3.1.5.2 Resistencia a la compresión

La Figura 7 presenta los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 90 días para las diez mezclas bajo investigación.

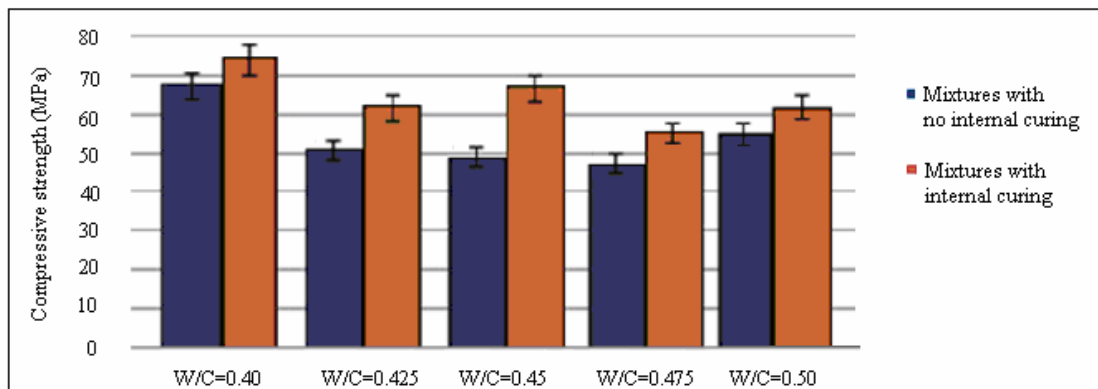


Figura 7: Resistencia a la compresión a la edad de 90 días

Como se muestra en la Figura 7, la resistencia a la compresión aumenta para cada W/CM en las muestras que se les aplicó curado interno en comparación con las que no se aplicó, presentando una variabilidad relativamente baja.

El mayor aumento en la resistencia a la compresión -18 MPa- fue obtenido para la W/CM igual a 0.45 mientras que el menor aumento -6 MPa- fue obtenido para la

mezcla de W/CM igual a 0.4. En promedio, las mezclas con curado interno mostraron una resistencia a la compresión 19% mayor que las mezclas que no se les aplicó curado interno.

Como el agregado liviano tiene una resistencia intrínseca menor que el agregado normal, es esperable una caída en la resistencia en los hormigones con agregado liviano (ACI 213, 2003). Sin embargo, las mezclas con curado interno (con agregado liviano) mostraron una resistencia mayor que aquellas sin curado interno. Se puede concluir que la resistencia ganada debido al aumento de un grado de hidratación mayor es mayor que la pérdida de resistencia causada por el uso de agregado liviano (cantidad de agregado liviano se mantuvo constante para todas las mezclas), por lo que la reducción de resistencia a la compresión debido al uso de agregado liviano debe haber sido similar para todas las mezclas.

Es interesante notar que la resistencia a la compresión de las muestras sin curado interno no varió desde la W/CM igual a 0.425 en adelante. Esto puede ser debido a las pobres condiciones de curado que produce importantes pérdidas de agua y con ello limitar el grado de hidratación. Esto sugiere que bajo pobres condiciones de curado una reducción en la W/CM no implica necesariamente proveer una mayor resistencia. Esto también ocurrió para las mezclas con curado interno, lo que significa que este método de curado no debe reemplazar el curado externo/tradicional, pero sí es un complemento útil para él.

3.1.5.3 Permeabilidad a los iones cloruros

La Figura 8 presenta los resultados del ensayo de permeabilidad a los iones cloruros de las diez mezclas en investigación:

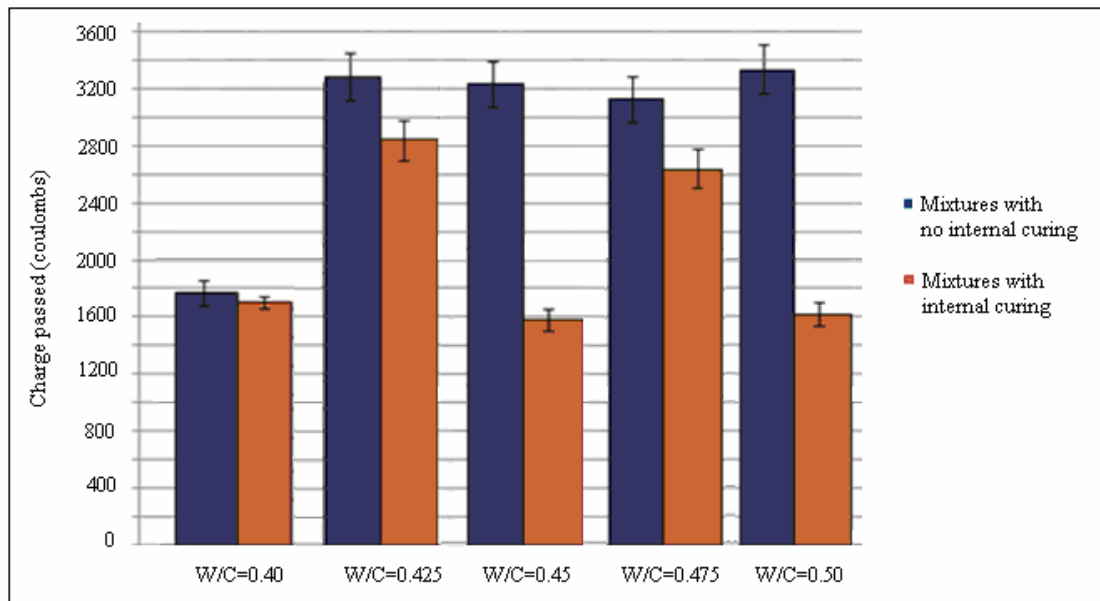


Figura 8: Permeabilidad a los iones cloruros a la edad de 90 días

Como muestra la Figura 8, las mezclas con curado interno exhibieron una menor permeabilidad en comparación con aquellas que no presentaron curado interno para la misma W/C.

La mayor disminución en la permeabilidad a los iones cloruros -1717 coulombs- fue obtenida para la mezcla de W/C igual 0.5 mientras que la menor disminución -97 coulombs- fue obtenida para la mezcla de W/C igual a 0.40. En promedio, las mezclas con curado interno presentaron una disminución de la permeabilidad a los iones cloruros en un 30% en comparación con las mezclas sin curado interno.

Estos resultados eran esperables dado que las mezclas con curado interno mostraron un mayor grado de hidratación, lo que significa que presenta una microestructura de poros de la pasta de cemento más compacta y menos permeable.

Se debe considerar que la disminución de la permeabilidad a los iones cloruros fue obtenida a pesar que se usó agregado liviano como agente de curado. El uso de un agregado más poroso puede producir un aumento en la permeabilidad. Sin embargo, como se concluye de estudios previos (Thomas, 2006) (Zhang y Gorr, 1991), en este caso la permeabilidad está controlada por la pasta de cemento más que por la permeabilidad del agregado.

3.1.6 Comparación estadística de las propiedades del hormigón y discusión de resultados

Es sabido que un grado de hidratación mayor en los materiales cementicios produce un incremento en la resistencia a la compresión y una disminución en la permeabilidad de los iones cloruros, lo que son las características más buscadas en un hormigón de alto desempeño.

Los resultados de los ensayos realizados en las diferentes mezclas con curado interno mostraron precisamente una mejora en estas propiedades en comparación con las que no presentaron curado interno.

El diseño experimental permite realizar comparaciones estadísticas para comprender mejor las aplicaciones del curado interno conlleva beneficios significativos en el incremento del grado de hidratación de las mezclas. El diseño experimental fue analizado mediante el test estadístico t-student para evaluar el desempeño del curado interno en la hidratación, en la resistencia a la compresión y en la permeabilidad a los iones cloruros como se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4: Comparación estadística de las propiedades del hormigón

	CCI ¹	SCI ²	CCI	SCI	CCI	SCI
Ensayo	Resistencia a la compresión		Permeabilidad a los iones cloruros		Grado de hidratación	
Muestras	15	15	10	10	19	19
Promedio	63 MPa	54 MPa	2076 coulombs	2953 coulombs	67%	51%
Desviación estándar	3.426		301.38		0.025	
Grados de libertad	28		18		36	
Valor-t	2.70		2.91		6.25	
Significancia (α)	1.20%		1.00%		0.00010%	
$T_{(1-\alpha)}$	2.69		2.88		5.88	
Hipótesis (H_0)	$CCI_{\text{resistencia}} = SCI_{\text{resistencia}}$		$CCI_{\text{permeabilidad}} = SCI_{\text{permeabilidad}}$		$CCI_{\text{hidratación}} = SCI_{\text{hidratación}}$	
Intervalo de rechazo	$t\text{-value} \geq t_{(1-\alpha)}$		$t\text{-value} \geq t_{(1-\alpha)}$		$t\text{-value} \geq t_{(1-\alpha)}$	

1: CCI: Con curado interno; 2: SCI: Sin curado interno

Los resultados del ensayo del test t-student mostraron que el curado interno:

- aumentó significativamente el grado de hidratación del cemento con un 99.9% de nivel de confianza,
- aumentó significativamente la resistencia a la compresión del hormigón con un 99.0% de nivel de confianza,
- disminuyó significativamente la permeabilidad a los iones cloruros con un 98.8% de nivel de confianza.

Las mezclas con curado interno no sólo mostraron un mayor grado de hidratación, sino que también presentaron una menor variabilidad en sus resultados tal como muestra su coeficiente de variación (ver Tabla 3). La reducción en la variabilidad de las mezclas con curado interno también fue observada en la resistencia a la compresión y en la permeabilidad a los iones cloruros. Es decir, el coeficiente de variación de las mezclas con curado interno disminuyó un 63 y 55% en comparación con las mezclas sin curado interno para la resistencia a la compresión y la permeabilidad a los iones cloruros respectivamente.

3.1.7 Conclusiones

El incremento en la competitividad en la industria de la construcción requiere de una producción de hormigones de alto desempeño, de mayores resistencias y mayor durabilidad. Estas características no dependen solamente de los constituyentes y su proporción en la mezclas, sino que dependen también del curado aplicado. Sin embargo, la actual velocidad en la industria de la construcción requiere de períodos más cortos de construcción, lo que atenta a la aplicación de un curado prolongado y adecuado en terreno.

Esta investigación busca aplicar el curado interno, una tecnología utilizada ampliamente en la última década en hormigones de baja W/CM como complemento del curado tradicional del hormigón in-situ para las mezclas de concreto con W/CM mayor a 0.42.

Se debe notar que las propiedades del hormigón se ven fuertemente afectadas bajo un pobre curado. Las muestras sin curado interno presentaron una hidratación en general menor a 55% y ninguna superó el 60%. Esto tuvo impacto directo en la resistencia a la compresión y en la permeabilidad a los iones cloruros.

El uso de curado interno permitió obtener un 15% de aumento en el grado de hidratación del cemento en condiciones de un curado externo pobre. Este

incremento en la hidratación se asume como la razón por la cual la resistencia a la compresión aumento en un 19% en las mezclas con curado interno. También se asume que es la causa de la disminución de la permeabilidad en un 30% en las mezclas con curado interno.

Se concluye que la aplicación del curado interno trae beneficios cuando es aplicado en hormigones tradicionales como un complemento a los métodos tradicionales de curado.

El curado interno reporto beneficios independientemente de la W/CM considerada. Esto quiere decir que las mezclas con altas W/CM bajo pobres condiciones de curado externo tiende a perder mayor cantidad de agua y alcanzan un grado de hidratación techo (que no puede ser mayor). Por lo tanto, el curado interno ayuda independientemente del contenido inicial de agua en la mezcla.

Esta investigación considero la misma cantidad de agua de curado interno independientemente de la W/CM de la mezcla. Futuras investigaciones deberían incrementar el agua de curado interno a medida que la W/CM aumenta, con la intención de contrarrestar la mayor pérdida de agua.

3.1.8 Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de la investigación por parte de CONICYT Chile a través del proyecto Fondecyt Regular n° 11060341. También agradecen el apoyo de Mario Olivares y al personal del DICTUC del área de RESMAT por el apoyo en preparación de muestras y ensayos, a Javier Castro por sus revisiones y consejos durante con respecto al análisis de los resultados experimentales, a los profesores Jorge Ramos y Patricio Pérez del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica. Finalmente, se reconoce el apoyo de Álvaro Paul, Marianela Noriega, Alex Leiva, Jorge Donoso, Daniel Moreno, Patricio Pinilla, Patricio García, Mauricio Guerra y Eduardo González por su ayuda durante el desarrollo experimental de la investigación.

3.1.9 Referencias

ACI Committee 213 (2003). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. American Concrete Institute.

Bentur, A., Igarashi, S.I. y Kovler, K. (2001). Prevention of Autogenous Shrinkage in High-Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No.11, 2001, pp. 1587-1591.

Bentz, D.P. (2007). Internal Curing of High-Performance Blended Cement Mortars, *ACI Materials Journal*. Vol. 104, No 4, pp 408-414

Bentz, D.P. y Hansen, K. (2000). Preliminary Observations of Water Movement in Cement Pastes During Curing Using X-Ray Absorption. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, No. 7, pp 1157-1168.

Bentz, D.P., Lura, P. y Roberts, J. (2005). Mixture Proportioning for Internal Curing. *Concrete International*, Vol. 27, No. 2, pp. 35-40.

Feng, X., Garboczi, E.J., Bentz, D.P., Stutzman, P.E. y Mason, T.O. (2004). Estimation of the Degree of Hydration of Blended Cement Pastes by a Scanning Electron Microscopy Point-Counting Procedure. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34, pp 1787-1793.

Jensen, O.M. (2007). Mechanisms of Internal Water Curing. *Internal Curing of Concrete, RILEM TC 199-ICC: State-of-the-Art-Report*, Chapter 3.

Jensen, O.M. y Hansen, F. (2001). Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 12, pp. 1859-1865.

López, M. (2005). Creep and Shrinkage of HPLC - *PhD thesis Mauricio López*.

López, M., Kahn, L.F. y Kurtis, K.E. (2005). Internal Curing in High Performance Concretes - A New Paradigm (en español). *Revista Ingeniería de Construcción*, V. 20, No. 2, pp. 117-126

López, M., Kahn, L.F. y Kurtis, K.E. (2008). Effect of Internally Stored Water on Creep of High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 3, pp. 265-273.

Mehta, P.K. y Monteiro, P.J.M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd ed.. *McGraw-Hill*.

Mindess, S., Young, J.F. y Darwing, D. (2003). *Concrete*. 2nd ed.: *Prentice Hall*.

Thomas, M.D.A. (2006). Chloride Diffusion in High-Performance Lightweight Aggregate Concrete. *ACI Special Publications*, NUMB 234, pp 797-812.

Zhang, M.H. y Gjorv, O.E. (1991). Characteristics of Lightweight Aggregate for High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 2, pp. 150–158.

3.2 Influencia del curado interno en las propiedades de hormigones con cemento portland y puzolanas naturales

3.2.1 Resumen

Para obtener un hormigón de mayor calidad y durabilidad es necesario promover una hidratación lo más completa posible de los agentes cementicios y evitar el agrietamiento temprano, por ejemplo, debido a la retracción hidráulica. En hormigones con bajo contenido de agua el riesgo de agrietamiento es mayor, condición que se ve más afectada en presencia de puzolanas que requieren la presencia de agua y humedad en el hormigón a edades posteriores. Esto se debe al desecamiento de la pasta y la consecuente caída de humedad relativa interna del hormigón.

La solución evidente es aplicar un curado eficaz que proporcione las condiciones óptimas para eliminar la retracción y evitar el desecamiento de la pasta de cemento. En esta investigación se optó por utilizar curado interno, técnica en que se distribuye agua en forma homogénea en el volumen de hormigón, alcanzando zonas que no serían curadas adecuadamente en forma tradicional, debido a la baja permeabilidad de la pasta de cemento.

La aplicación del curado interno mostró ser una técnica efectiva para disminuir la retracción autógena del hormigón, la cual es más fuerte en presencia de puzolanas naturales, llegando a mostrar valores menores entre un 26 y un 53% en las muestras fabricadas con curado interno en comparación con las mezclas sin curado interno.

Palabras claves: hidratación, curado interno, puzolanas, humedad relativa, retracción autógena.

3.2.2 Introducción

El curado del hormigón es un proceso de gran relevancia desde las primeras horas después de la colocación, para mantener las condiciones óptimas de hidratación y así obtener la durabilidad y resistencia requerida en el hormigón endurecido; Lo que posibilitará de un alto desempeño de la estructura durante su vida útil (Mehta y Monteiro, 2006).

Por lo tanto, con el fin de maximizar la hidratación del cemento y de los eventuales materiales cementicios suplementarios y reducir los problemas de agrietamiento originados por la retracción temprana (retracción autógena, retracción plástica y parte de la retracción hidráulica), es importante aplicar un curado eficaz y por un tiempo prolongado.

Las técnicas de curado más comúnmente utilizadas consideran el aporte de humedad desde el exterior así destaca el uso de riego en spray, riego con agua, uso de cubiertas saturadas y la inundación (Kovler y Jensen, 2005). Si bien estas técnicas de curado externo pueden ser muy efectivas para hormigones convencionales, la factibilidad de aplicarlas por tiempos prolongados en la actualidad es difícil porque interrumpen o demoran otras actividades críticas para el avance de la obra, provocando rápidas caídas de la humedad relativa interna del hormigón e interrumpiéndose el proceso de hidratación. Esta situación es aún más compleja cuando el hormigón posee materiales cementicios suplementarios como puzolanas naturales, debido a que reacciones de hidratación secundarias requieren del suministro de agua por tiempos más prolongados.

En hormigones de razón agua-cemento (W/CM) bajo 0.42, aproximadamente, no se tiene el agua suficiente para promover la hidratación completa de los materiales cementicios, llevando a un consumo rápido del agua y a una caída acelerada de la humedad interna de la mezcla. Así cuando las puzolanas requieran de agua para reaccionar con el hidróxido de calcio y formar silicatos de calcio hidratados, éstas no contarán con el agua suficiente. Esto provocará que una proporción de los

materiales cementicios queden como material inerte promoviendo un mal desempeño mecánico y una menor durabilidad del mismo. Es por ello que, en ciertos casos, es necesario suministrar agua adicional para promover la hidratación y no solamente prevenir la pérdida de agua como lo hacen los métodos de curado externo convencionales (ACI 308, 1980). En adición, un hormigón de W/CM igual a 0.3 posee una baja permeabilidad por lo que, incluso con un buen método de curado externo, se dificulta la entrada de agua desde el exterior (López et. al., 2005) (Bentz, 2007). Por lo anterior se ha propuesto aplicar curado interno como complemento al curado externo (Phileo, 1991) (Jensen y Hansen, 2001), que consiste en almacenar agua al interior del hormigón, la que no estará disponible durante el mezclado por lo que no cambiará W/CM pero es liberada posteriormente para promover las reacciones de hidratación de los materiales cementicios.

3.2.2.1 Hidratación de materiales cementicios

La hidratación ocurre cuando los materiales cementicios entran en contacto con el agua, originándose productos de hidratación, como los silicatos de calcio hidratados, que le otorgan gran parte de la resistencia al hormigón, y otros como el hidróxido de calcio, la etringita y el monosulfato (Mehta y Monteiro, 2006). Del agua que no reacciona químicamente con los materiales cementicios, una parte es adsorbida por la superficie de los productos de hidratación, otra queda retenida en los intersticios intercapas de los silicatos de calcio hidratado y el resto del agua queda en forma de solución en los poros capilares que se originan durante la hidratación debido a la retracción química (Mehta y Monteiro, 2006). La retracción química es la reducción de volumen interno de la pasta de cemento hidratada, debido a que el volumen de los productos de hidratación es menor que el volumen de los productos que la forman (Jensen y Hansen, 2001).

Los agentes cementicios obtienen el agua necesaria para promover su hidratación de los poros capilares, cuyo vaciado genera tensiones capilares que, a nivel macroscópico, se traducen en reducciones volumétricas en un sistema cerrado, isotérmico y no sujeto a fuerzas externas conocidas como retracción autógena (Jensen y Hansen, 2001).

Se requieren de dos condiciones necesarias para obtener una hidratación completa de los materiales cementicios: i) debe haber espacio suficiente para la formación de los productos de hidratación y ii) debe haber agua suficiente. En los hormigones con W/CM menor a 0.36 no hay espacio suficiente para la formación de dichos productos, mientras que en hormigones cuya W/CM se encuentra entre 0.36 y 0.42 se deberá administrar agua adicional de curado para alcanzar una hidratación óptima (Mindess et al., 2003) (Powers, 1960).

3.2.2.2 Reacciones químicas secundarias en cementos con puzolanas naturales

La ACI 116R (1957) define a las puzolanas naturales como un material silíceo que posee muy baja capacidad cementicia pero que, dividido muy finamente y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar componentes que poseen propiedades cementicias.

Cuando una mezcla de cemento portland puro y puzolanas entran en contacto la reacción puzolánica progresa. Durante la reacción ocurren dos fenómenos: primero, hay una disminución gradual en el tiempo de los hidróxidos de calcio libres y, segundo, hay un incremento en la formación de silicatos y aluminosilicatos de calcio hidratados, similares a los productos de hidratación del cemento portland, estudios muestran que el contenido de hidróxidos de calcio disminuye de 2.2% a 0.7% en hormigones con cemento portland con 40% de

adiciones puzolánicas en comparación con hormigones con cemento portland puro (Lea, 1971), esto se traduce en mayor contenido de silicatos de calcio hidratado y otros productos de baja porosidad (Mehta, 1987)

3.2.2.3 Características de hormigones con adiciones puzolánicas

El reemplazo parcial de cemento portland por puzolana de alta razón $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ incrementa la resistencia del hormigón a los ataques de sulfatos y sustancias contenidas en aguas marinas (Mehta, 1987). En parte, esto es atribuible a la disminución de hidróxido de calcio libre formado durante la hidratación del cemento portland. El resultado es que el hormigón endurecido contiene menos hidróxido de calcio, contiene más silicatos de calcio hidratado y otros productos de baja porosidad.

Por otro lado la disminución de hidróxidos de calcio en el hormigón reduce el pH inicial del hormigón haciéndolo más vulnerable a la carbonatación, despasivación de armaduras y potencial problema de corrosión (ACI 232, 2002).

El hormigón con adición de puzolanas naturales tiene una estructura más fina de poros como resultado de la reacción puzolánica. Esta característica es importante para promover aumentos en la durabilidad y resistencia mecánica del hormigón (Mehta, 1987).

La forma, finura, distribución de tamaño de partículas, densidad y composición de las puzolanas naturales posee gran influencia en las propiedades del hormigón en estado fresco y en el desarrollo de la resistencia del hormigón endurecido (ACI 232, 2002).

3.2.2.4 Uso de puzolanas naturales en el hormigón

El uso de las puzolanas naturales como reemplazo parcial o adición al cemento portland se recomienda para hormigones que necesiten un bajo calor de hidratación, por ejemplo, represas u otra estructura fabricada con hormigón masivo; en estructuras que requieren hormigones resistentes al ataque de sulfatos, como puentes o muelles; entre otros (Mielenz et. al.,1950).

En la actualidad, el uso de puzolanas naturales es recomendado por razones económicas y para reducir el consumo de energía, además de reducir las emisiones de CO₂ producto de la fabricación del cemento portland y para alcanzar ciertos beneficios técnicos, tal como una menor permeabilidad de la pasta hidratada (Mehta, 1987).

Investigaciones anteriores han mostrado que el uso de puzolanas como reemplazo del volumen del cemento en un 20% a 30%, resultó en la generación de menor calor de hidratación, aumento de la cohesión de la pasta y una reducción en la expansión debido a la reacción álcali-sílice (Andriolo, 1975).

3.2.2.5 Efectos de las puzolanas naturales en las propiedades del hormigón

Se debe considerar que el cemento portland es, en general, más denso que las puzolanas por lo que, al hacer el reemplazo por volumen, tendremos un hormigón más liviano y, al hacerlo por masa, tendremos un hormigón con mayor volumen de pasta.

El efecto en los requerimientos de agua también debe ser determinado. Las puzolanas naturales deben ser consideradas como un agente cementicio secundario, por lo que se deben considerar al momento de estimar la W/CM. Algunas adiciones minerales causan un incremento importante en el requerimiento de agua y otras tienen un efecto casi despreciable (Mahter, 1958). Además la reacción

puzolánica es tardía, por lo que requerirá agua de curado por un tiempo más prolongado.

Utilizar puzolanas, en general, produce una mezcla más cohesiva manteniendo una consistencia plástica y mejorando la trabajabilidad. Las puzolanas naturales absorben agua de la mezcla y la mantienen en el sistema permitiendo mejorar el acabado (ACI 232, 2002).

En hormigones donde los agregados disponibles son deficientes en partículas finas (partículas menores a $75\ \mu\text{m}$), el uso de puzolanas finamente divididas reduce la exudación y segregación, también aumenta la resistencia del hormigón al mejorar la compactación de la mezcla suministrando los finos que faltan del agregado.

Generalmente, un hormigón que contiene puzolanas tiene una menor permeabilidad, menor calor de hidratación, una disminución en la expansión por reacción álcali-agregado, mayor resistencia a edades tardías y una mayor resistencia al ataque de sulfatos (Mather, 1958). Un hormigón de $W/CM=0.4$ con reemplazo de 15% de puzolanas por cemento portland con respecto a la masa muestra un incremento de 36 MPa a 48 MPa en su resistencia a la compresión (Zhang y Malhotra, 1996). Estudios sobre la expansión debida a la reacción álcali-sílice mostraron una reducción de 0.28% a 0.02% en hormigones con un 30% de reemplazo de puzolanas a la edad de un año (Saad et al., 1982). Aunque el uso de cementos con bajo contenido de álcalis es satisfactorio para evitar la expansión con la mayoría de los agregados más reactivos, en algunos agregados se requiere el control adicional que provee el uso de puzolanas naturales u otro.

La retracción por secado del hormigón fabricado con cementos puzolánicos depende de la hidratación del material cementicio y de la demanda de agua de la mezcla. Generalmente, un hormigón con puzolanas tiene menor módulo de elasticidad que uno similar sin puzolanas, por lo que la tendencia al agrietamiento como resultado de la retracción por secado es menor en los hormigones con puzolanas. Estudios (Fig.1) han mostrado que la retracción por secado, en hormigones con 10, 20 y 30% de reemplazo de cemento por puzolanas naturales,

no mostraron diferencias significativas en comparación con la muestra de control con cemento portland puro (Mehta, 1981), donde todas las muestras estuvieron en un rango de 0.05 y 0.06%. Sin embargo, estudios muestran una diferencia de 400 a 600 $\mu\epsilon$ entre un hormigón con 10% de puzolanas naturales (metakaolin) y una muestra de control sin adiciones puzolánicas (Zhang y Malhotra, 1995)

3.2.2.6 Curado del hormigón

El curado del hormigón cumple un rol muy importante en promover la hidratación, minimizar la retracción a edades tempranas y el desecamiento de la pasta de cemento. Un curado adecuado es vital para la calidad del hormigón. Todas las mezclas de hormigón con W/CM mayor a 0.42 contienen más agua que la teórica requerida para la hidratación completa del cemento que contienen. Sin embargo, cualquier pérdida de agua por evaporación limitará el máximo grado de hidratación a obtener por el cemento. Un hormigón con W/CM menor a 0.42 requiere de agua de curado adicional para alcanzar el grado de hidratación óptimo. Un aspecto muy importante del curado, pero que muchas veces se olvida, es que no sólo debe prevenir la evaporación del agua de la mezcla y mantener al hormigón a una adecuada humedad relativa interna y temperatura, sino también minimizar la retracción del hormigón.

3.2.3 Significancia de la investigación

Con el fin de mantener una humedad interna alta en el hormigón y proveer agua en la etapa que la puzolana quiera reaccionar con el hidróxido de calcio, se debe proveer un curado eficaz y prolongado, permitiendo formar los productos de hidratación necesarios y obtener un hormigón más durable y de mejor calidad.

En la actualidad, los cementos chilenos contienen adiciones puzolánicas naturales obteniendo un hormigón menos permeable y más difícil de curar desde el exterior.

El objetivo de esta investigación es mostrar los beneficios adicionales en el hormigón al aplicar curado interno como complemento al curado externo, pues el curado interno tiene la finalidad de proveer un reservorio de agua que es entregada a medida que los agentes cementicios la van requiriendo para su hidratación por gradientes de humedad relativa.

Se pretende cuantificar y explicar los efectos en la resistencia a la compresión, la permeabilidad a los iones cloruro y la retracción autógena del hormigón en el caso de cementos con adiciones puzolánicas chilenas.

3.2.4 Etapa experimental

3.2.4.1 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental fue diseñado de manera de poder cuantificar el efecto del curado interno a medida que aumenta el reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales. Se escogió tres propiedades relevantes: resistencia a compresión para simbolizar el comportamiento estructural; la retracción autógena para representar la tendencia al agrietamiento; y la permeabilidad a ión cloruro para representar la durabilidad del hormigón.

De esta manera fueron fabricadas ocho mezclas con razón agua-materiales cementicios (W/CM) igual a 0.3, las cuales contenían distintas cantidades de puzolanas naturales por reemplazo del cemento portland puro. Cada mezcla fue ensayada con y sin la aplicación de curado interno. La edad escogida de ensayo fue 90 días por considerar que gran parte de la hidratación había ocurrido para esa edad. Las probetas de resistencia y permeabilidad fueron colocadas en moldes cilíndricos de 100 x 200 mm, desmoldadas 24 horas después de su colocación y mantenidas en cámara humedad relativa mayor a 95%. Las probetas de retracción autógena fueron preparadas en moldes corrugados de 350 x 10 mm y ensayados a partir del tiempo de fraguado final.

Con el objeto de controlar el proceso de hidratación de los agentes cementicios y evitar variabilidad de los resultados, se optó por mantener constantes en todas las mezclas de prueba el volumen de pasta y el de agregados, además de la W/CM.

Con respecto a los agentes cementicios, se fabricaron hormigones con cuatro combinaciones distintas entre cemento portland puro y puzolanas naturales. El reemplazo de cemento portland por puzolanas se hizo en porcentajes de 0%, 13%, 26% y 39% en masa. Para cada combinación se fabricaron dos mezclas, una de

referencia y otra en la que se consideró el uso de curado interno por medio del uso de agregado liviano prehumedecido.

Aunque existen varios agentes de curado potencialmente útiles para implementar el curado interno, esta investigación considera el uso de arcilla expandida (un agregado liviano artificial) en fracción bajo 5 mm ya que ha sido aplicado exitosamente en mezclas de baja W/CM previamente (Jensen y Lura, 2006)).

Este agente de curado fue escogido por su capacidad de absorción, desorción y por su tamaño de partículas que permite una mayor distribución del mismo dentro de la mezcla de hormigón y, por lo tanto, optimizar la eficacia del curado interno minimizando la distancia de transporte de agua la cual está limitada (Bentz, 2007). Las propiedades de la arcilla expandida utilizada se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5: Propiedades del agente de curado utilizado

	Arcilla expandida arena
Rango de tamaño (mm)	0.08 – 5
Absorción a 1 día	21.2%
Absorción a 3 días	28.5%
Absorción a 21 días	30.6%
Absorción a 32 días	30.8%
Densidad real seca (kg/m³)	1.653
Densidad real saturada con superficie seca (SSS) (kg/m³)	1.920
Porosidad¹	41%
Desorción² (%/días x 10⁵)	10.1

1: La porosimetría fue medida mediante el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)

2: La desorción fue medida monitoreando la cantidad de agua perdida por el agregado liviano – inicialmente sumergido en agua por 3 días – mientras se mantenía a una humedad relativa de 97%. El valor entregado es la pendiente de agua entregada al ambiente versus tiempo en %/días x 10⁵.

Las mezclas fabricadas con W/CM igual a 0.3 se hicieron en base a mantener el volumen de pasta constante en 35%. El agregado liviano, utilizado como agente de curado interno, se reemplazó por el agregado fino normal en igual volumen y se calculó la cantidad a utilizar en base al método desarrollado por Bentz y Snyder (Bentz et. al., 2005), considerando teóricamente un 25% de absorción de la arcilla expandida, con el fin de subestimar la capacidad de absorción del agente de curado. Este método consiste en proveer el agua de curado interno necesaria para mantener los poros de la pasta completamente saturados, promoviendo una mayor hidratación y una minimización de la retracción autógena. La cantidad de agua de curado según este método es directamente proporcional a la cantidad de cemento, el grado de hidratación máximo esperado

(83.33%) y la retracción química (CS) a hidratación completa. En esta investigación se consideró un valor de CS igual a 0.055 que corresponde a un valor típico para el cemento (Kovler, 2007), para las mezclas con puzolanas naturales se entregó la misma cantidad de agente de curado, por lo que es posible que se haya entregado una cantidad menor de la necesaria por una posible retracción química mayor en las puzolanas naturales en comparación con la del cemento. Estudios han mostrado que las adiciones puzolánicas presentan diferentes valores de retracción química (Bentz, 2007).

La Tabla 6 presenta los diseños de mezcla utilizados en cada una de las ocho mezclas del estudio.

Tabla 6: Diseño de mezclas (cantidades en kg/m³ de hormigón)

Porcentaje de puzolanas	0%		13%		26%		39%	
Condición de curado	SCI ¹	CCI ²	SCI	CCI	SCI	CCI	SCI	CCI
Agua	155	155	153	153	150	150	148	148
Cemento portland tipo I	518	518	442	442	370	370	300	300
Puzolanas Naturales	0	0	66	66	130	130	192	192
Gravilla (10 mm) ³	790	790	790	790	790	790	790	790
Arena fina ⁴	965	799	966	802	965	804	965	807
Arcilla expandida	0	119	0	117	0	115	0	113
Aditivo superplastificante (2,5%)	13	13	13	13	13	13	12	12
Densidad teórica (kg/m ³)	2441	2393	2429	2382	2418	2371	2407	2361

1: SCI: Sin curado interno; 2: CCI: Con curado interno; 3: Agregado silíceo 10-mm tamaño máximo;

4: Agregado silíceo 5-mm tamaño máximo. Todas las mezclas fueron diseñadas en base a un 2% de aire ocluido.

3.2.4.2 Ensayos realizados

Los ensayos de resistencia a la compresión fueron realizados a los 90 días según norma ASTM C39. Se ensayaron al menos 2 probetas cilíndricas de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro para cada una de las ocho mezclas fabricadas.

El ensayo de permeabilidad a ión cloruro fue realizado según norma ASTM C1202. Se aserraron probetas de 50 ± 2 mm a partir de los cilindros de 100 x 200 mm, las cuales fueron cubiertas en su sección lateral con cemento caucho para sellar la superficie de hormigón. Luego, se mantuvieron en una cámara de vacío durante 3 horas con una presión menor a 5 cm de columna de Hg. Posteriormente, se introdujo agua desaireada en la cámara de vacío y se mantuvo la presión durante 1 hora más. Pasado este período se apagó la bomba de presión y se dejó las probetas sumergidas durante 18 ± 2 horas.

Luego de condicionar las probetas, se procedió con el ensayo que consiste en colocar los extremos de las probetas entre dos celdas, una con 3% de solución NaCl (el cual será conectado al polo negativo) y la otra con 0.3 N de solución NaOH (el cual será conectado al polo positivo). Luego las celdas se conectan a los polos una fuente de poder de 60 V y se mide la corriente que atraviesa la probeta durante 6 horas realizando mediciones cada 30 minutos. La carga que atraviesa la probeta será proporcional a su permeabilidad a ión cloruro. Así a menor carga conducida a través de la probeta menor es su permeabilidad lo que indicaría la durabilidad esperada de la mezcla.

El ensayo de retracción autógena fue realizado según norma ASTM C1698. Se colocó la mezcla de hormigón en un molde cilíndrico corrugado, flexible y hermético, de modo que no presentara restricción a la retracción y que impidiera la evaporación de agua y pérdida de humedad interna de la mezcla, por lo que todas las deformaciones registradas corresponden a retracción autógena (retracción por

auto-secado: deformación autógena en un sistema de materiales) (Jensen y Hansen, 2001).

Se midió el tiempo de fraguado mediante ensayo Vicat (ASTM C199). El largo inicial de la probeta después del fraguado final se contabilizó como el largo inicial de la probeta y se midieron los cambios dimensionales durante un tiempo no menor a 40 días mediante el uso de un marco metálico rígido con un deflectómetro digital de alta precisión.

El molde y las muestras fueron mantenidos a $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ para no registrar variaciones dimensionales por efectos térmicos.

3.2.5 Etapa de análisis de resultados de ensayos

3.2.5.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión a 90 días de edad que presentaron las muestras de las distintas mezclas se pueden ver en la Figura 9:

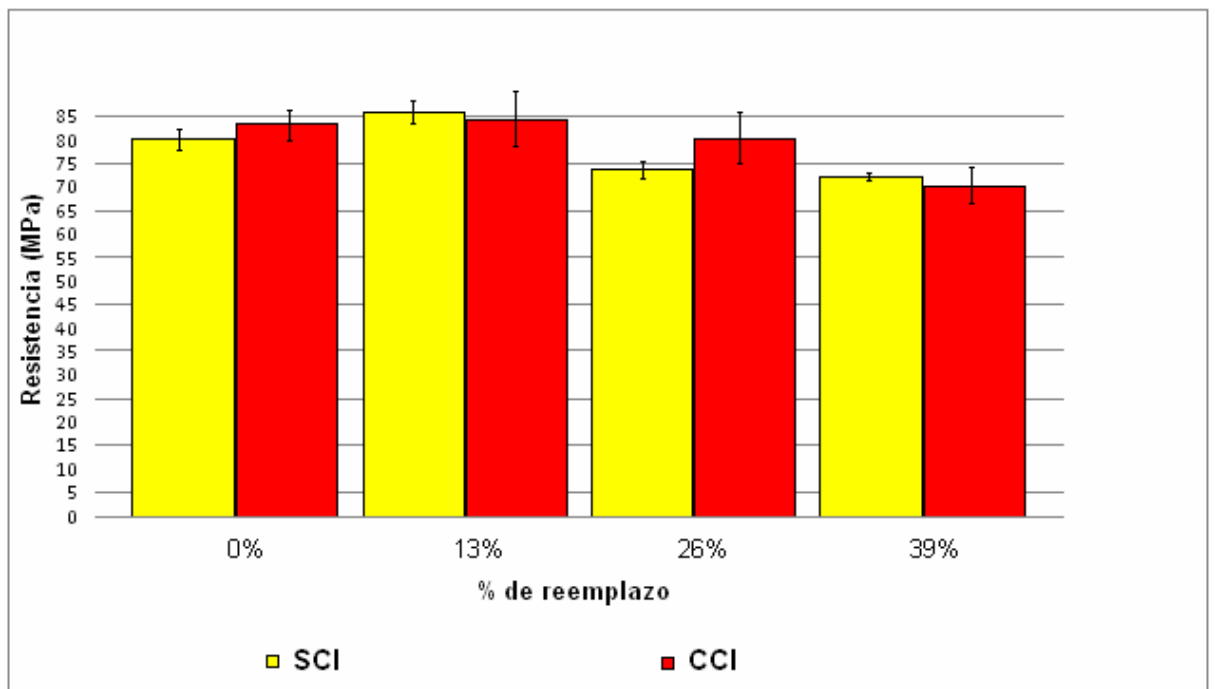


Figura 9: Resistencia a la compresión a los 90 días con distintos porcentajes de reemplazo de puzolanas con y sin curado interno ($W/CM=0.3$)

El gráfico muestra que las probetas ensayadas no muestran una diferencia significativa entre las probetas en las que se aplicó curado interno en comparación con las que no se usó esta técnica (para una misma proporción de reemplazo de puzolanas naturales), siendo relativamente baja la variabilidad que presentaron las muestras ensayadas.

Todas las mezclas tenían la misma cantidad de agente de curado, pues la cantidad de agua de curado interno se mantuvo constante para todas las muestras en que se aplicó esta técnica. Puesto que la resistencia intrínseca del agregado liviano es menor que la resistencia intrínseca del agregado normal al cual reemplaza (Videla y López, 2002), basados en consideraciones puramente mecánicas se espera una disminución en la resistencia a compresión de las mezclas con curado interno por incluir una fase de menor resistencia intrínseca. Sin embargo, en la Figura 9 se puede observar que dicha reducción en la resistencia no ocurrió en este caso lo que se interpreta como una manifestación del incremento en resistencia mecánica de la pasta de cemento (cemento más puzolanas naturales) por el efecto de la aplicación de curado interno. Es decir el aumento en hidratación habría producido un aumento en resistencia que es capaz de contrarrestar la pérdida de resistencia esperada por el uso de un agregado liviano.

Comparando los distintos porcentajes de reemplazo de puzolanas se observa una caída en la resistencia a la compresión a medida que aumenta mucho el porcentaje de reemplazo. Por ejemplo las mezclas con 39% de reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales presentaron una resistencia a compresión de aproximadamente 86,7% de aquella obtenida con sólo cemento portland. Sin embargo, se puede apreciar del gráfico que la resistencia con 13% de puzolanas es mayor que aquella con cemento portland puro, lo que permite cuestionar si existe un óptimo de reemplazo de puzolanas naturales para llegar a una resistencia máxima.

La aplicación del curado interno no muestra beneficios estadísticamente significativos en ganancia de resistencia a la compresión. De acuerdo al ensayo

estadístico t-student por comparación de medias se indica que hay un 81% de probabilidad de que no existan diferencias significativas entre la resistencia a la compresión de las muestras con curado interno y aquellas sin curado interno. Es decir bajo las condiciones óptimas de curado externo, ya que las muestras fueron almacenadas a 100% humedad relativa hasta la edad de ensayo, el uso de un agente de curado interno no produjo diferencias apreciables en resistencia a compresión.

3.2.5.2 Permeabilidad a los iones cloruros

La permeabilidad a los iones cloruros que presentaron las muestras de las distintas mezclas se pueden ver en la Figura 10:

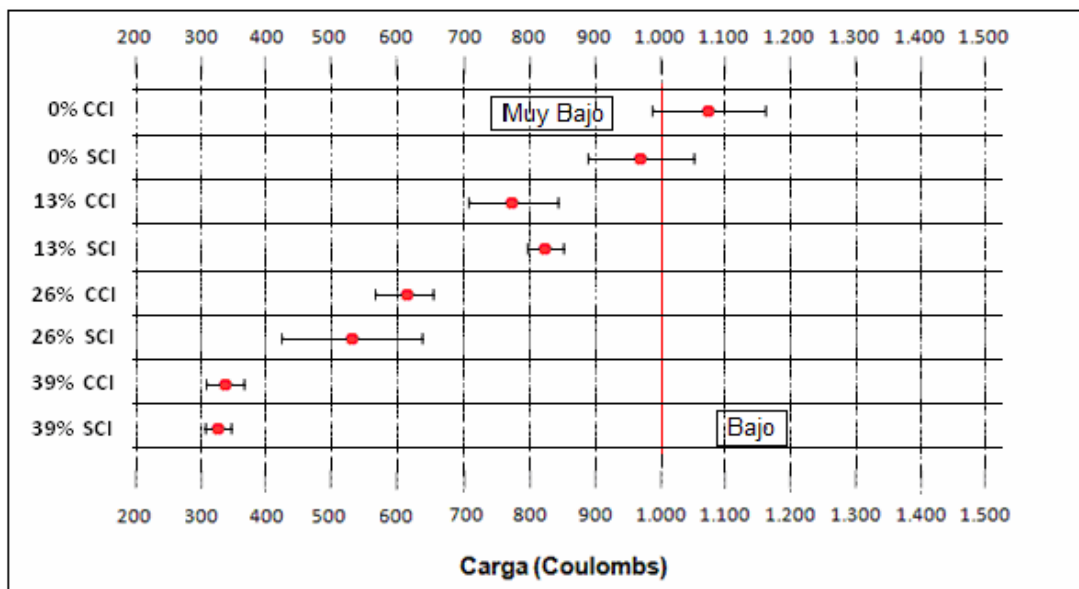


Figura 10: Permeabilidad a los iones cloruros a los 90 días de hormigones con distintos porcentajes de reemplazo de puzolanas con y sin curado interno ($W/CM=0.3$)

Considerando el mismo nivel de reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales, se tiene que la permeabilidad a iones cloruro de las mezclas con curado interno y sin curado interno son similares. Se observa entonces que el uso de curado interno no produce diferencia apreciable en permeabilidad a iones cloruro en las condiciones experimentales usadas en esta investigación. Sin embargo, se detectan diferencias importantes al reemplazar el contenido de cemento portland por puzolanas naturales. Por ejemplo, mezclas sin puzolanas naturales tuvieron permeabilidades a ión cloruro cercanas a 1000 coulombs mientras que aquellas con 13, 26 y 39% de reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales tuvieron una permeabilidad cercanas a 800, 600 y 300 coulombs, respectivamente. Esto ocurre ya que las puzolanas reaccionan con el hidróxido de calcio en presencia de humedad, con lo que el hormigón endurecido contiene menos cantidad hidróxido de calcio y contiene más silicatos de calcio hidratado y otros productos de baja porosidad, lo que conlleva una mayor impermeabilidad (Mehta, 1987).

Al igual que en el caso de la resistencia a la compresión, la aplicación del curado interno no muestra beneficios estadísticamente significativos en la disminución de la permeabilidad a los iones cloruros. Valores obtenidos de la prueba estadística t-student indican que hay un 74% de probabilidad de que no existan diferencias significativas entre permeabilidad al ión cloruro de las muestras con curado interno y aquellas sin curado interno.

3.2.5.3 Retracción autógena

La retracción autógena que tuvieron las distintas muestras se pueden ver en la Figura 11:

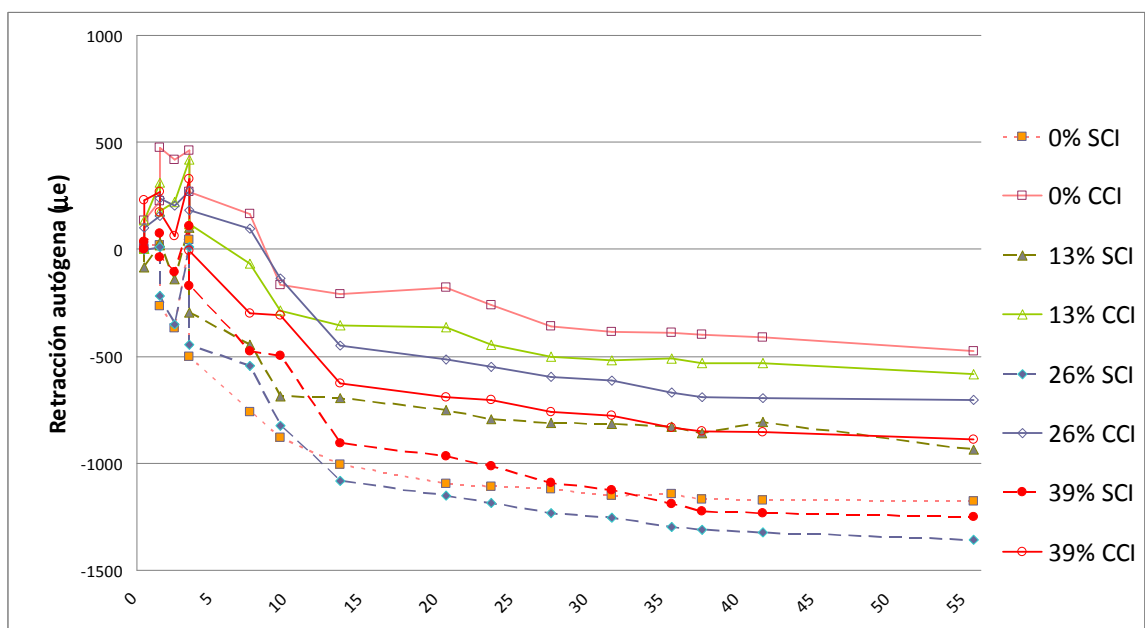


Figura 11: Retracción autógena en el tiempo de hormigones con distintos porcentajes de reemplazo de puzolanas, con y sin curado interno ($W/CM=0.3$)

Después de 56 días de medición, se observa que las mezclas sin curado interno presentaron retracciones autógenas entre 963 y 1395 $\mu\epsilon$ dependiendo del nivel de reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales. Por otro lado, las mezclas con curado interno presentaron retracciones autógenas entre 555 y 891 $\mu\epsilon$ dependiendo del nivel de reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales. Se puede observar entonces de la Figura 11 que en todas las muestras en las que se aplicó curado interno, la retracción autógena disminuyó significativamente con

respecto a mezclas con la misma cantidad de puzolanas naturales y sin curado interno. Considerando los niveles de reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales de 0, 13, 26 y 39%, se obtuvo una disminución de retracción autógena de 621, 254, 641 y 382 $\mu\epsilon$.

La gran contribución del curado interno en la retracción autógena se observa principalmente dentro de los primeros 5 días de edad en donde ocurre una expansión autógena en lugar de retracción autógena. Esto ha sido observado anteriormente por diversos autores (Bentz y Snyder, 1999, Bentur et al., 2001; Jensen y Hansen, 2002; Zhutovsky et al., 2002,) y puede ser atribuido a la presencia de agua en los poros capilares que produce reducción en las tensiones capilares de retracción y a la presencia de agua entre capas de los silicatos de calcio hidratados que producen separación de éstas e hinchamiento.

La disminución de la retracción autógena es ventajosa para disminuir el agrietamiento a edades tempranas del hormigón causadas por las tensiones generadas cuando el hormigón presenta restricción a la deformación, además se debe considerar que la retracción experimentada ocurre en edades posteriores del hormigón cuando ya ha ganado mayor resistencia.

La aplicación del curado interno muestra beneficios estadísticamente significativos en la disminución de la retracción autógena. Valores obtenidos de la prueba estadística t-student indican que hay un 99,9% de probabilidad de que existan diferencias significativas entre la retracción autógena de las muestras con curado interno y aquellas sin curado interno. Los datos experimentales han coincidido con conclusiones que muestran que el curado interno minimiza la retracción autógena sin afectar propiedades mecánicas como la resistencia (Cusson & Hoogeveen, 2008).

La Figura 11 muestra una clara relación entre el contenido de reemplazo de cemento portland por puzolanas naturales y la retracción autógena experimentada por las mezclas. Con la sola excepción de la mezcla sin curado interno y 13% puzolanas naturales, se puede afirmar que siempre que aumenta el contenido de

puzolanas naturales, aumenta también la retracción autógena. Esto sugiere que las puzolanas naturales presentan mayor retracción autógena y el consumo de agua para su hidratación acelera el autosecado de la mezcla. Se concluye entonces que un buen curado y, específicamente, un buen curado interno son más necesarios a medida que aumenta el contenido de puzolanas naturales.

Se concluye además que el contenido de agua de curado interno no fue suficiente para prevenir la ocurrencia de la retracción autógena de la mezcla con cemento portland puro ni de las mezclas con puzolanas naturales. Mayores contenidos de agua de curado interno pueden ser necesarias para reducir más aun la retracción autógena.

3.2.5.5 Discusión de resultados

Los resultados de retracción autógena evidencian que la aplicación de curado interno realizada en esta investigación no fue capaz de eliminarla, aunque sí se logró reducirla entre un 26 y un 53%. Esto se contrapone con datos obtenidos de aplicación de curado interno con hormigones con sílica fume y cenizas volantes donde se logra eliminar totalmente la retracción autógena (Bentz, 2007).

Por otro lado, los ensayos de resistencia a compresión y permeabilidad de iones cloruros evidencian una disminución en dichas propiedades a medida que aumenta el contenido de puzolanas naturales y no muestran una influencia significativa de la aplicación de curado interno. Esto podría deberse a que la demanda de agua de las puzolanas naturales sea mayor que la del cemento como se ha concluido con otras puzolanas (Ayres y Khan, 1993; Malhotra y Mehta, 2009), por lo que a mayor cantidad de puzolanas naturales mayor sería el déficit de agua de curado. Además, debemos considerar que la reacción puzolánica tiene una retracción química mayor y es relativamente insensible a una caída en humedad relativa (Jensen y Hansen, 2001). Un estudio de curado interno con puzolanas de diferente

tipo concluyó que en la cantidad de agua de curado interno requerida es altamente dependiente del tipo de puzolana (Bentz, 2007).

3.2.6 Conclusiones

Los hormigones de baja W/CM y con puzolanas, como los utilizados en esta investigación, requieren la aplicación de un curado eficaz por su gran demanda de agua. Esto es muy difícil de lograr basado solamente en curado externo tradicional ya que la baja permeabilidad que poseen y a la necesidad de un curado prolongado para permitir la ocurrencia de reacciones puzolánicas.

El curado interno surge así como una alternativa promisorio para promover la hidratación en dichas circunstancias complejas.

Se ha observado que el beneficio principal del curado interno en estas mezclas de W/CM=0.3 y puzolanas naturales es la disminución en la retracción autógena. Se ha observado además que el uso de agregado liviano prehumedecido como agente de curado interno no disminuye la resistencia del hormigón ni aumenta su permeabilidad a iones cloruro por lo que puede ser utilizado para disminuir la retracción autógena sin riesgo a perjudicar las otras propiedades.

El hecho que el curado interno muestra ser beneficioso para retracción autógena, pero parece ser de poca consideración para resistencia a compresión y permeabilidad a ión cloruro se puede explicar basado en las diferencias en el curado externo a que fueron sujetas las probetas ensayadas de cada propiedad. Así, las probetas ensayadas para resistencia y permeabilidad a los iones cloruros estuvieron sometidas a una condición óptima de curado externo (100% humedad relativa y $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$) mientras que las de retracción autógena recibieron solamente un sellado. Esto implica que en las primeras probetas, el beneficio incremental del curado interno pudo haber resultado poco significativo comparado al beneficio del

curado externo; sin embargo, en los especímenes sellados, donde se impedía captar agua desde el exterior, el curado interno juega un rol crítico.

También se puede concluir que la adición de puzolanas produjo diferencias en el comportamiento de las propiedades mecánicas del hormigón, a medida que aumentaba el porcentaje de reemplazo por cemento portland. Se obtuvo un máximo en la resistencia promedio con un 13% de reemplazo puzolanas y la menor resistencia promedio se obtuvo con un 39% de reemplazo de puzolanas, presentando una diferencia entre ella de 19,8%.

Adicionalmente, se muestra en los resultados que la permeabilidad a los iones cloruros disminuye a medida que aumenta el contenido de puzolanas. La mezcla con cemento portland puro presentó permeabilidades de hasta tres veces mayor que la mezcla con 39% de reemplazo de puzolanas.

Se observa que la retracción autógena aumenta junto al contenido de puzolanas, esto debido que las puzolanas necesitan agua de curado a edades posteriores que el cemento por su reacción tardía por lo que estrategias efectivas de curado, como el curado interno, se hacen más necesarias en hormigones con puzolanas naturales. Las puzolanas además disminuyen la permeabilidad de la mezcla por lo que un suministro externo de agua (curado externo) se hace más complicado.

3.2.7 Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de la investigación por parte de CONICYT Chile a través del proyecto Fondecyt Regular n° 11060341. También agradecen el apoyo de Mario Olivares y al personal del DICTUC del área de RESMAT por el apoyo en preparación de muestras y ensayos, a los profesores Jorge Ramos y Patricio Pérez del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica. Finalmente, se reconoce el apoyo de Álvaro Paul, Marianela Noriega, Alex Leiva, Jorge Donoso, Daniel Moreno, Patricio Pinilla, Patricio García, Mauricio Guerra y Eduardo González por su ayuda durante el desarrollo experimental de la investigación.

3.2.8 Referencias

ACI Committee 116R (1957). Cement and Concrete Terminology. American Concrete Institute.

ACI Committee 308 (1980). Standard Practice for Curing Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.

ACI Committee 232 (2002). Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete. American Concrete Institute.

ACI Committee 213 (2003). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. American Concrete Institute.

Andriolo, F.R. (1975). A Utilizacao da Pozzolana na Construcado do Conjunto Hidroeletrico de Urubupunga, *CESP Publication, Companhia Energetica de Sao Paolo*, Brazil.

Ayers, M.E. y Khan, M.S. (1993). Overview of Fly Ash and Silica Fume Concretes: The Need for Rational Curing Standards. Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium: American Concrete Institute, pp. 605-617.

Bentur, A., Igarashi, S.I. y Kovler, K. (2001). Prevention of Autogenous Shrinkage in High-Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No.11, 2001, pp. 1587-1591.

Bentz, D.P. (2007). Internal Curing of High-Performance Blended Cement Mortars, *ACI Materials Journal*. Vol. 104, No 4, pp 408-414

Bentz, D.P. y Hansen, K. (2000). Preliminary Observations of Water Movement in Cement Pastes During Curing Using X-Ray Absorption. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, No. 7, pp 1157-1168.

Bentz, D.P., Lura, P. y Roberts, J. (2005). Mixture Proportioning for Internal Curing. *Concrete International*, Vol. 27, No. 2, pp. 35-40.

Bentz, D.P. y Snyder, K.A. (1999). Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29: pp. 1863-1867.

Cusson, D., Lounis, Z. y Daigle, L. (2010). Benefits of Internal Curing on Service Life and Life-Cycle Cost of High-Performance Concrete Bridge Decks – A Case Study. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. 5, pp. 339-350.

Jensen, O.M. (2007). Mechanisms of Internal Water Curing. *Internal Curing of Concrete, RILEM TC 199-ICC: State-of-the-Art-Report*, Chapter 3.

Jensen, O.M. y Hansen, F. (2001). Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 12, pp. 1859-1865.

Jensen, O.M. y Lura, P. (2006). Techniques and Materials for Internal Water Curing of Concrete. *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 9, pp. 817-825

Lea, F.M. (1971). The Chemistry of Cement and Concrete. *Chemical Publishing Inc.*, pp. 414-453

López, M. (2005). Creep and Shrinkage of HPLC - *PhD thesis Mauricio López*.

López, M., Kahn, L.F. y Kurtis, K.E. (2005). Internal Curing in High Performance Concretes - A New Paradigm (en español). *Revista Ingeniería de Construcción*, V. 20, No. 2, pp. 117-126

López, M., Kahn, L.F. y Kurtis, K.E. (2008). Effect of Internally Stored Water on Creep of High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 3, pp. 265-273.

Malhotra, V.M. y Mehta, P.K. (2009). High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportions, Properties, Construction Practice, and Case Histories. 3er ed. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.

Mather, B. (1958). The Partial Replacement of Portland Cement in Concrete, *Cement and Concrete*, STP-205, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., pp. 37-73

Mehta, P. K. (1981). Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin-Earth, *Cement and Concrete Research*, V. 11, pp. 507-518.

Mehta, P. K. (1987). Natural Pozzolans: Supplementary Cementing Materials, *CANMET, Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology*, Athens, Greece, V. M. Malhotra, ed., May, pp. 407-430.

Mehta, P.K. y Monteiro, P.J.M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd ed.. McGraw-Hill.

Mielenz, R.C., Witte, L. y Glantz, O. (1950). Effect of Calcination on Natural Pozzolans. *American Society for Testing and Materials*, STP No 99, pp. 43-92.

Mindess, S., Young, J.F. y Darwing, D. (2003). *Concrete*. 2nd ed.: Prentice Hall.

Philleo, R. E. (1991). Concrete Science and Reality. In J. Skalny and S. Mindess (Ed.), *Materials Science of Concrete II* (pp. 1-8). American Ceramic Society.

Powers, T.C. (1960). Physical Properties of Cement Paste. *Skokie: Bulletin 154, Portland Cement Association*, pp. 577-613.

Saad, M., de Andrade, W. P. y Paulon, V. A. (1982). Properties of Mass Concrete Containing an Active Pozzolan Made from Clay, *Concrete International*, V.4, No. 7, July, pp. 59-65

Thomas, M.D.A. (2006). Chloride Diffusion in High-Performance Lightweight Aggregate Concrete. *ACI Special Publications*, NUMB 234, pp 797-812.

Yue, L., Junling, Bao., y Yilin, G. (2010). The Relationship Between Autogenous Shrinkage and Pore Structure of Cement Paste With Mineral Admixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1855-1860.

Zhang, M.H. y Gjorv, O.E. (1991). Characteristics of Lightweight Aggregate for High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 2, pp. 150–158.

Zhang, M.H. Y Malhotra, V. M. (1995). Characteristics of a Thermally Activated Alumino-Silicate Pozzolanic Material and its Use in Concrete, *Cement and Concrete Research*, V. 25, No. 8, pp. 1713-1725.

Zhang, M.H. y Malhotra, V. M. (1996). High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material, *ACI Materials Journal*, V.93, No. 6, Nov.-Dec., pp 629-636

Zhutovsky, S., Kovler, K., and Bentur, A. (2002), Efficiency of Lightweight Aggregate for Internal Curing of High Strength Concrete to Eliminate Autogenous Shrinkage. *Materials and Structures*, Vol 35: pp. 97-101

IV. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

El aumento de la competitividad en la industria de la construcción requiere la producción de un hormigón de mayor rendimiento, con mayor resistencia y durabilidad. Estas características no dependen sólo de los componentes y la dosificación de la mezcla, sino también de curar. Sin embargo, los requisitos actuales de construcción de velocidad son generalmente en contra de la aplicación de un adecuado curado del concreto. Adicionalmente el desarrollo de los hormigones de alto desempeño y alta resistencia han conllevado al uso de hormigones de baja W/CM y además agregar adiciones minerales en reemplazo de cemento, con lo que se hace más necesario un curado eficaz.

Esta investigación, como muchas otras, ha mostrado beneficios y consecuencias de aplicar curado interno en hormigones, pero aún quedan muchas preguntas por responder y criterios por analizar para hacer factible su aplicación en la industria del hormigón.

Se debe analizar la factibilidad de abstraer las condiciones de laboratorio para aplicar curado interno en terreno, para ello se debe estudiar la posibilidad económica de obtener un agente de curado adecuado e implementar un método que permita controlar la humedad del mismo con el fin de no proveer agua adicional a la mezcla manteniendo constante la W/CM.

Por otro lado, es imprescindible controlar efectivamente la pérdida de agua de la mezcla de hormigón y conocer la cantidad de agua de curado interno para promover una hidratación óptima de los agentes cementicios.

4.1 Conclusiones de la investigación

Las conclusiones generales de esta investigación se pueden dividir según los dos objetivos e hipótesis analizadas mediante distintos procedimientos experimentales:

4.1.1 Conclusiones hipótesis i)

Bajo condiciones deficientes de curado externo (humedad relativa de 50% y temperatura ambiente de 23 °C), se mostró que la aplicación de curado interno como complemento al curado tradicional en obra para hormigones de alta W/CM (entre 0.4 y 0.5) presenta grandes beneficios en las propiedades del hormigón.

De los ensayos realizados se observa que las propiedades del hormigón se ven fuertemente afectadas según el tipo de curado y tienen directa correlación con el grado de hidratación. Por ejemplo, las mezclas sin curado interno presentaron un grado de hidratación en promedio inferior al 55% y ninguna de las muestras superó el 60%; lo que tuvo un impacto directo en la resistencia a la compresión y a la permeabilidad a los iones cloruros.

Para ilustrar lo anteriormente señalado, se puede ver que el curado interno permitió un aumento del 15% en el grado de hidratación en las muestras bajo un curado externo deficiente. Este aumento en el grado de hidratación tuvo como consecuencia un aumento del 19% en la resistencia a la compresión y una disminución del 30% en la permeabilidad a los iones cloruros en comparación con aquellas muestras que no fueron sometidas a curado interno.

Se concluye que la aplicación de curado interno trae beneficios cuando se aplica en hormigones tradicionales como complemento a los métodos convencionales de curado externo. A medida que aumenta la W/CM se tiene mayor cantidad de agua disponible para la hidratación, pero que ante pobres condiciones de curado se

pierde una gran cantidad de agua al ambiente, haciendo útil la aplicación de curado interno para contrarrestar estas pérdidas de agua.

4.1.2 Conclusiones hipótesis ii)

Bajo condiciones excelentes de curado externo (cámara humedad a 100% de humedad relativa o curado sellado), se observó que el beneficio principal del curado interno en las mezclas de $W/CM=0.3$ con puzolanas naturales es la disminución en la retracción autógena. Se ha observado además que el uso de agregado liviano prehumedecido como agente de curado interno no disminuye la resistencia del hormigón ni aumenta su permeabilidad a iones cloruro por lo que puede ser utilizado para disminuir la retracción autógena sin riesgo a perjudicar las otras propiedades.

Se desprende de los resultados que, ante excelente condiciones externas de curado húmedo, el hormigón no presentó mejoras en la resistencia a la compresión ni en la permeabilidad a los iones cloruros cuando se utilizó la técnica complementaria del curado interno.

Además se observó que, ante condiciones externas de sellado, el hormigón presentó una disminución notoria en la retracción autógena cuando se utilizó la técnica complementaria del curado interno.

También se puede concluir que la adición de puzolanas produjo diferencias en el comportamiento de las propiedades mecánicas del hormigón, a medida que aumentaba el porcentaje de reemplazo del cemento portland. Además, se observó de los ensayos de permeabilidad a los iones cloruros que a medida que aumenta el contenido de puzolanas, esto se debe a que su estructura más fina de poros ocupa de forma más efectiva los espacios libres en la mezcla.

Se observa que la retracción autógena aumenta a medida que el contenido de puzolanas es mayor, esto debido que las puzolanas necesitan agua de curado a

edades posteriores que el cemento por su reacción tardía. En hormigones de baja W/CM el agua es escasa, por lo que son críticas las tensiones generadas por los requerimientos mayores de agua de las puzolanas debido a su estructura de microporos y a su alta área superficial, lo que conlleva a un aumento de la retracción autógena.

En conclusión, se puede inferir que las puzolanas naturales efectivamente requieren una mayor cantidad de agua, la que es vital entregar mediante un buen método de curado. Las puzolanas además disminuyen la permeabilidad de la mezcla por lo que la acción del curado externo se hace cada vez más limitada. Se observa que el curado interno conlleva beneficios en las propiedades del hormigón ante un curado externo que no es capaz de suministrar el agua de curado de forma eficiente. También se observa que el contenido de puzolanas afecta las propiedades del hormigón de forma diferente según su porcentaje de reemplazo y que, con la cantidad de agua necesaria, el desempeño del hormigón puede mejorar cuando se reemplaza una fracción de cemento portland por puzolanas naturales.

4.2 Futuras investigaciones posibles

Los resultados y análisis de esta investigación abren una gran gama de posibles vías a desarrollar para complementar la información obtenida mediante esta investigación. En esta sección se nombran algunas posibles direcciones a seguir, mas no todas.

De los resultados obtenidos para la aplicación de curado interno a hormigones tradicionales se abren dos grandes interrogantes que pueden ser evaluadas en un futuro por alumnos de investigación:

1.- Realizar investigaciones sobre el grado de hidratación que alcanzan las mezclas con curado interno variando la cantidad de agua de curado y monitorear la pérdida de masa en el tiempo de las mezclas para relacionar grado de hidratación versus agua total (agua de la mezclas más agua del agente de curado) disponible para la hidratación.

2.- Realizar investigaciones que tengan grados intermedios de evaluación del curado interno según sus condiciones de curado externo, es decir, comparar que beneficios traería aplicar curado interno en hormigones tradicionales ante un buen curado externo, un regular curado externo y un pobre curado externo.

De los resultados obtenidos para la aplicación del curado interno en hormigones con adiciones puzolánicas naturales chilenas es importante investigar:

1.- Estudiar el grado de hidratación de las mezclas con adiciones puzolánicas y correlacionar con la retracción autógena que experimentan las mezclas.

2.- Investigar el beneficio y las consecuencias de aplicar curado interno a hormigones con adiciones puzolánicas bajo distintos grados de curado externo.

3.- Evaluar la cantidad de agua de curado interno necesaria para promover una hidratación óptima de los agentes cementicios según la cantidad de adiciones puzolánicas. En esta investigación se calculó mediante el método de Bentz y Snyder (2005) que considera un índice para la cantidad de agente cementicio, pero no discrimina la presencia de distintos agentes cementicios. Si la necesidad de agua de curado es distinta para distintos agentes cementicios, se debe calcular la cantidad de agua de curado interno en base a las proporciones de ellos.

4.- Realizar investigaciones de los beneficios de aplicar curado interno en presencia de distintas adiciones puzolánicas como cenizas volantes, microsílíce y escorias de alto horno entre otras.

5.- Realizar mezclas con distintos porcentajes de puzolanas naturales con pasos más pequeños y acotados para determinar si existe un óptimo de contenido de éstas para alcanzar una resistencia máxima.

REFERENCIAS

ACI Committee 116R (1957). Cement and Concrete Terminology. American Concrete Institute.

ACI Committee 308 (1980). Standard Practice for Curing Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.

ACI Committee 232 (2002). Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete. American Concrete Institute.

ACI Committee 213 (2003). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. American Concrete Institute.

Andriolo, F.R. (1975). A Utilizacao da Pozzolana na Construcado do Conjunto Hidroelectrico de Urubupunga, *CESP Publication, Companhia Energetica de Sao Paolo*, Brazil.

Ayers, M.E. y Khan, M.S. (1993). Overview of Fly Ash and Silica Fume Concretes: The Need for Rational Curing Standards. Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium: American Concrete Institute, pp. 605-617.

Bentur, A., Igarashi, S.I. y Kovler, K. (2001). Prevention of Autogenous Shrinkage in High-Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No.11, 2001, pp. 1587-1591.

Bentz, D.P. (2007). Internal Curing of High-Performance Blended Cement Mortars, *ACI Materials Journal*. Vol. 104, No 4, pp 408-414

Bentz, D.P. y Hansen, K. (2000). Preliminary Observations of Water Movement in Cement Pastes During Curing Using X-Ray Absorption. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, No. 7, pp 1157-1168.

Bentz, D.P., Lura, P. y Roberts, J. (2005). Mixture Proportioning for Internal Curing. *Concrete International*, Vol. 27, No. 2, pp. 35-40.

Bentz, D.P. y Snyder, K.A. (1999). Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29: pp. 1863-1867.

Cusson, D., Lounis, Z. y Daigle, L. (2010). Benefits of Internal Curing on Service Life and Life-Cycle Cost of High-Performance Concrete Bridge Decks – A Case Study. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, No. 5, pp. 339-350.

Feng, X., Garboczi, E.J., Bentz, D.P., Stutzman, P.E. y Mason, T.O. (2004). Estimation of the Degree of Hydration of Blended Cement Pastes by a Scanning Electron Microscopy Point-Counting Procedure. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34, pp 1787-1793.

Jensen, O.M. (2007). Mechanisms of Internal Water Curing. *Internal Curing of Concrete, RILEM TC 199-ICC: State-of-the-Art-Report*, Chapter 3.

Jensen, O.M. y Hansen, F. (2001). Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 12, pp. 1859-1865.

Jensen, O.M. y Lura, P. (2006). Techniques and Materials for Internal Water Curing of Concrete. *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 9, pp. 817-825

Kovler, K. (2007). Effect of Internal Curing on Autogenous Deformation. *Internal Curing of Concrete, RILEM TC 199-ICC: State-of-the-Art-Report*, Chapter 7.

Lea, F.M. (1971). The Chemistry of Cement and Concrete. *Chemical Publishing Inc.*, pp. 414-453

López, M. (2005). Creep and Shrinkage of HPLC - *PhD thesis Mauricio López*.

López, M., Kahn, L.F. y Kurtis, K.E. (2005). Internal Curing in High Performance Concretes - A New Paradigm (en español). *Revista Ingeniería de Construcción*, V. 20, No. 2, pp. 117-126

López, M., Kahn, L.F. y Kurtis, K.E. (2008). Effect of Internally Stored Water on Creep of High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 3, pp. 265-273.

López, M., Kahn, L.F. y Kurtis, K.E. (2010). High-Strength Self-Curing Low-Shrinkage Concrete for Pavement Applications. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 00, No. 0, pp. 1-10

Malhotra, V.M. y Mehta, P.K. (2009). High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportions, Properties, Construction Practice, and Case Histories. 3er ed. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.

Mather, B. (1958). The Partial Replacement of Portland Cement in Concrete, *Cement and Concrete*, STP-205, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., pp. 37-73

Mehta, P. K. (1981). Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin-Earth, *Cement and Concrete Research*, V. 11, pp. 507-518.

Mehta, P. K. (1987). Natural Pozzolans: Supplementary Cementing Materials, *CANMET, Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology*, Athens, Greece, V. M. Malhotra, ed., May, pp. 407-430.

Mehta, P.K. y Monteiro, P.J.M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd ed.. McGraw-Hill.

Mielenz, R.C., Witte, L. y Glantz, O. (1950). Effect of Calcination on Natural Pozzolans. *American Society for Testing and Materials*, STP No 99, pp. 43-92.

Mindess, S., Young, J.F. y Darwing, D. (2003). *Concrete*. 2nd ed.: Prentice Hall.

Philleo, R. E. (1991). Concrete Science and Reality. In J. Skalny and S. Mindess (Ed.), *Materials Science of Concrete II* (pp. 1-8). American Ceramic Society.

Powers, T.C. (1960). Physical Properties of Cement Paste. *Skokie: Bulletin 154, Portland Cement Association*, pp. 577-613.

Saad, M., de Andrade, W. P. y Paulon, V. A. (1982). Properties of Mass Concrete Containing an Active Pozzolan Made from Clay, *Concrete International*, V.4, No. 7, July, pp. 59-65

Thomas, M.D.A. (2006). Chloride Diffusion in High-Performance Lightweight Aggregate Concrete. *ACI Special Publications*, NUMB 234, pp 797-812.

Videla, C. y López, M. (2000). Influence of Lightweight Aggregate Intrinsic Strength on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 15, No. 1, pp. 43-57.

Yue, L., Junling, Bao., y Yilin, G. (2010). The Relationship Between Autogenous Shrinkage and Pore Structure of Cement Paste With Mineral Admixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1855-1860.

Zhang, M.H. y Gjorv, O.E. (1991). Characteristics of Lightweight Aggregate for High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 2, pp. 150–158.

Zhang, M.H. Y Malhotra, V. M. (1995). Characteristics of a Thermally Activated Alumino-Silicate Pozzolanic Material and its Use in Concrete, *Cement and Concrete Research*, V. 25, No. 8, pp. 1713-1725.

Zhang, M.H. y Malhotra, V. M. (1996). High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material, *ACI Materials Journal*, V.93, No. 6, Nov.-Dec., pp 629-636

Zhutovsky, S., Kovler, K., and Bentur, A. (2002), Efficiency of Lightweight Aggregate for Internal Curing of High Strength Concrete to Eliminate Autogenous Shrinkage. *Materials and Structures*, Vol 35: pp. 97-101

ANEXOS

Anexo A: Procedimiento del ensayo Loss On Ignition (LOI)

Este documento describe el método de ensayo para determinar la pérdida de masa por ignición de una muestra de hormigón hidratado.

a) Consideraciones

El procedimiento de este ensayo fue obtenido de la norma ASTM C114. Se utiliza para estimar el grado de hidratación alcanzado por los agentes cementicios.

b) Instrumentos

Combo, para romper las probetas de hormigón hasta dejarlas en trozos pequeños.

Mortero metálico sellado, para golpear trozos de hormigón hasta hacerlos polvo.

Crisoles cerámicos, para colocar el hormigón en estado de polvo.

Balanza de alta precisión, para medir la masa de hormigón en polvo con precisión 0.01 grs.

Horno convencional, para preparar el hormigón en polvo a una temperatura de 105 °C.

Muflas, horno eléctrico que controla temperatura digitalmente hasta 1100 °C.

Tenazas largas, para colocar crisoles dentro de la mufla.

Guantes protectores, para proteger manos y antebrazos de altas temperaturas.

Gafas protectoras, para proteger los ojos de la radiación de la mufla.

c) Probetas

Se fabricaron probetas de hormigón de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, las cuales son fracturadas en pequeños trozos mediante un combo metálico para luego ser golpeados por un mortero metálico que deja el hormigón en polvo.

d) Procedimiento

- Colocar el hormigón molido en un crisol de masa conocida.
- Medir la masa del crisol más el hormigón.
- Dejar secar la muestra en un horno a una temperatura entre 105 y 110 °C durante un mínimo de 6 horas para remover la humedad y el agua capilar de la muestra.
- Medir la masa del crisol más el hormigón después de sacarlo del horno.
- Insertar los crisoles utilizando las tenazas y los elementos de protección en la mufla (ya encendida) a una temperatura mínima de 1000°C por un mínimo de 2 horas.
- Al transcurrir el período se debe apagar la mufla y esperar que se enfríe la muestra.
- Medir la masa del crisol más el hormigón después de sacarlo de la mufla.
- Repetir el procedimiento para los distintos componentes del hormigón por separado. Esto se hace para corregir la pérdida de masa por ignición sólo de los materiales hidratados.

Anexo B: Procedimiento del ensayo de penetración de iones cloruro

Este documento describe el método de ensayo para determinar la carga eléctrica que atraviesa una probeta de hormigón endurecido.

a) Consideraciones

El procedimiento de este ensayo fue obtenido de la norma ASTM C1202.

b) Instrumentos

Aserradora de hormigón, para realizar el corte de las probetas.

Equipo de saturación, para mantener aisladas las probetas para su preparación.

Bomba de vacío, para realizar el vacío de la cámara.

Pie de metro, para medir las probetas con una precisión de 0.1 mm.

Sellador de probetas, utilizar cemento de caucho o similar para sellar las probetas.

Sellador de alta temperatura, utilizar silicona roja o similar para sellar las juntas entre probetas y el equipo.

Solución de cloruro de Sodio, al 3%.

Solución de hidróxido de Sodio, 0.3 Normal.

Voltímetro, para medir el voltaje cada 30 min.

Amperímetro, para medir amperes cada 30 min con exactitud de 0.000 amperes.

Termómetro, con una incertidumbre de ± 0.5 °C.

Reloj o cronómetro, para determinar los tiempos de medición.

Fuente de poder, para generar corriente con diferencia de potencial de 60V.

Cables biaxiales, para realizar las conexiones eléctricas.

Celda ensayo, para montar las probetas.

Dispositivo propulsor de fluidos o embudo, para llenar las celdas con las soluciones.

c) Probetas

- Se utilizarán 2 probetas de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro.
- Se utilizarán probetas o testigos cilíndricos de 50 mm $\pm$ 2 mm de altura y 100 mm de diámetro nominal.
- Se procede a realizar un primer aserrado a 30 mm del extremo correspondiente a la base de contacto de la probeta con el molde, se descarta el corte realizado y se reitera el aserrado de la probeta a una distancia de 50 mm $\pm$ 2 mm. Esta porción conforma la probeta de ensayo.
- El aserrado se realizará el día del ensayo luego de curado húmedo y antes del saturado.
- Para el ensayo se aplicará una diferencia de potencial de 60V.

d) Procedimiento

- Hervir 1 litro o más de agua de la llave en un recipiente hermético, remover el recipiente del calor y taparlo firmemente.
- Se determina el diámetro del área de la sección transversal de cada una de las probetas o testigos de la serie de ensayo, promediando los largos de dos diámetros normales medidos en la mitad de la altura de cada espécimen.
- Deje secar la superficie de las probetas por lo menos 1 hora y se sella con pintura impermeabilizante toda la superficie lateral de las probetas y dejar secar según instrucciones del fabricante.
- Poner probetas en aparato de vacío donde la presión debe disminuir bajo los 50 mm Hg (6650 Pa) y mantener por 3 horas.
- Agregar el agua desaireada preparada en **1** con la bomba de vacío encendida hasta cubrir la probeta.
- Cierre el paso de agua y deje la bomba encendida por 1 hora más.
- Retirar vacío de la cámara del equipo de saturación y dejar sumergida la probeta por 18 ± 2 horas.
- Remover la probeta del agua y transferirla a una zona de humedad de 95% o más.
- Colocar el espécimen en la celda de voltaje, aplicar sello en la junta y esperar el tiempo necesario para que endurezca.

- Llenar un lado de la celda con 3% de solución NaCl (el cual será conectado al polo negativo).
- Llenar el otro lado de la celda con 0.3 N de solución NaOH (el cual será conectado al polo positivo).
- Realizar las conexiones eléctricas.
- Encender fuente de poder con 60V +/- 0.1V y anotar la corriente inicial. La temperatura debe ser de 20 a 25°C. En hormigones muy permeables si la temperatura excede los 90°C se debe terminar el ensayo, esto significa que el hormigón es muy permeable.
- En este momento cuando se conecta la fuente de poder se da inicio al ensayo.
- Se deben tomar mediciones por lo menos cada 30 minutos hasta completar 6 horas de monitoreo.

Para obtener los resultados se debe integrar el área bajo la curva para obtener los amperes-segundo o coulomb. Si se toma la corriente cada 30 minutos se puede aplicar la fórmula siguiente.

$$Q=900 (I_0+2I_{30}+2I_{60}+2I_{90}+.....+2I_{300}+2I_{330}+I_{360})(3)$$

Si el espécimen tiene un diámetro distinto a 95mm el valor de la carga que paso se debe ajustar con la siguiente fórmula.

$$Q_x=Q_{95}x(3.75/x)^2(4)$$

Luego se debe evaluar la permeabilidad al ion cloruro con la siguiente tabla.

Tabla A1: Clasificación ASTM 1202

Carga Pasada [coulomb]	Permeabilidad Ion Cloruro
mayor 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baja
100 - 1000	Muy Baja
menor 100	Despreciable

Anexo C: Procedimiento del ensayo de retracción autógena

Este documento describe el método de ensayo para determinar la retracción autógena experimentada por el hormigón.

a) Consideraciones

El procedimiento de este ensayo fue obtenido de la norma ASTM C168.

b) Instrumentos

Tubos corrugados, para colocar la muestra de hormigón y no presentarle restricción al movimiento.

Cuchara, para colocar el hormigón dentro del tubo.

Vara metálica, para compactar el hormigón dentro del tubo corrugado.

Tapas de goma, para tapar el tubo corrugado con un material que no absorba agua.

Plancha circular metálica, para colocar en el extremo de la tapa de goma un material rígido. En este ítem se utilizaron fichas de taca-taca.

Huinchas aislantes, para sellar la unión entre el tubo y la tapa.

Aparato Vicat, para medir el tiempo de fraguado.

Contenedor hermético, para guardar el molde Vicat durante el tiempo de fraguado.

Deflectómetro, para medir las deformaciones experimentadas por el hormigón ya fraguado con precisión de 1×10^{-3} mm.

Marco rígido indeformable, para colocar las muestras en tubos corrugados y medir deformaciones con el deflectómetro.

Molde metálico, para utilizar como referencia de medida para medir deformaciones

Cámara Binder o similar, para mantener las muestras y el marco rígido a una humedad y temperatura constante.

c) Probetas

Se fabricaron mezclas de hormigón que se colocaron en tubos corrugados que no presentan restricción a la deformación e impiden la pérdida de humedad hacia el ambiente, por lo que el único cambio volumétrico que puede experimentar corresponde a retracción autógena.

d) Procedimiento

- Colocar el hormigón en un tubo corrugado y sellar bien con las tapas y usando huincha aislante.
- Medir el tiempo de fraguado con el aparato Vicat, al terminar el fraguado se toma la medida inicial.
- Se coloca el tubo corrugado en el marco rígido y se calcula el largo inicial con el deflectómetro.
- Se toman medidas a media hora, una hora, tres horas y seis horas.
- Luego se toman medidas periódicas durante un período largo hasta que la deformación vaya tendiendo a cero.

- Se debe mantener el marco rígido y las muestras en la cámara Binder a temperatura y humedad constante para minimizar efectos secundarios como deformaciones térmicas.

Anexo D: Imágenes etapa experimental

a) Resistencia a la compresión



Figura 12: Prensa utilizada en ensayo de resistencia a la compresión



Figura 13: Tipo de falla de probeta en ensayo de resistencia a la compresión

b) Permeabilidad a los Iones Cloruros

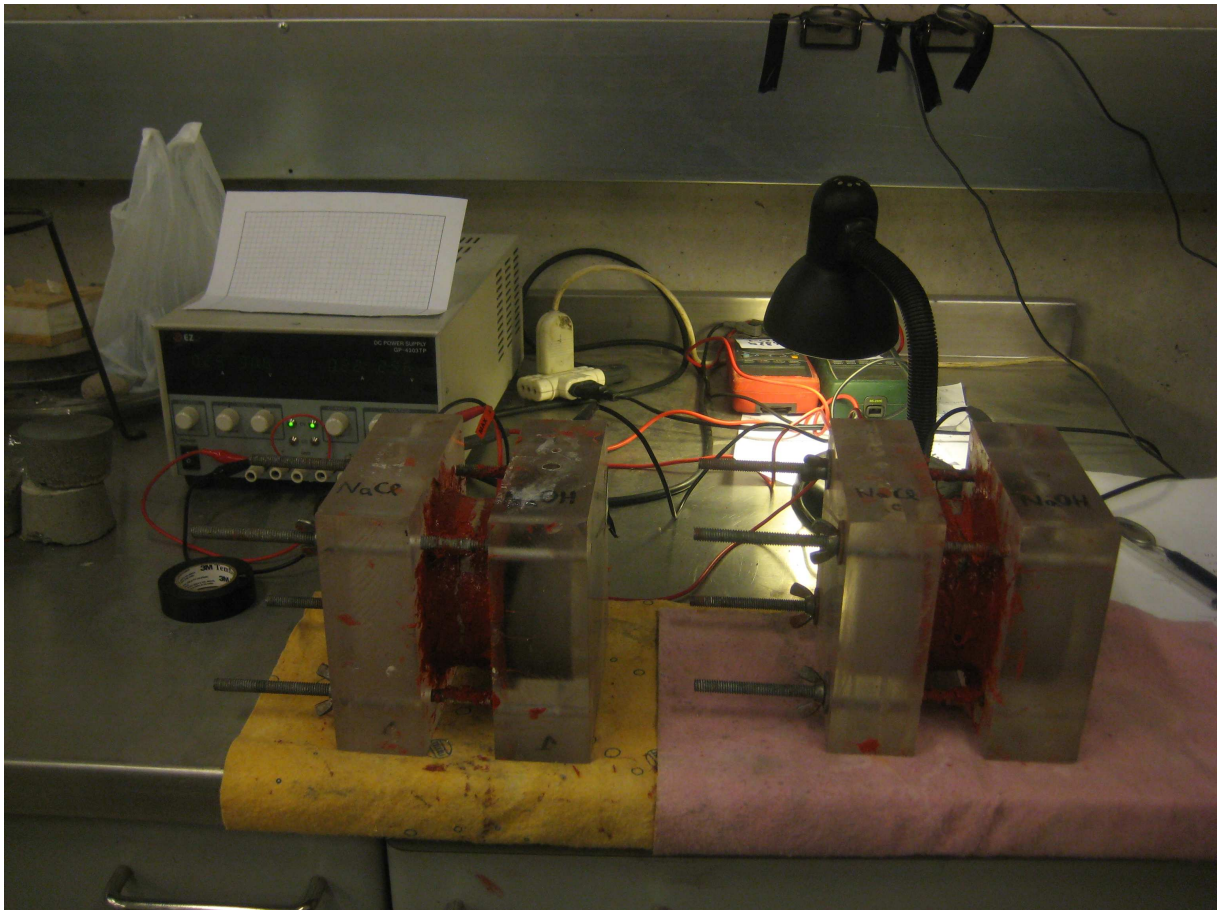


Figura 14: Ensayo de permeabilidad a los iones cloruros

c) Ensayo de Loss On Ignition (LOI)



Figura 15: Mortero metálico para moler hormigón



Figura 16: Hormigón en proceso de molienda



Figura 17: Colocación de crisoles en muflas



Figura 18: Muestra de hormigón sometida a temperaturas sobre 1000 °C

d) Retracción Autógena



Figura 19: Marco rígido con deflectómetro digital para medir deformaciones



Figura 20: Deflectómetro digital de alta precisión



Figura 21: Muestras en cámara Binder para control de temperatura y humedad

Anexo E: Tablas de resultados

a) Objetivo i)

Resistencia a la compresión

W/CM=0.4

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

30/04/2009

1	Diámetro	98.00	mm
	Altura	20.30	cm
	Masa	3.38	kg
	Fuerza	54.11	ton
	Resistencia	70.348716	MPa
2	Diámetro	98.00	mm
	Altura	20.30	cm
	Masa	3.38	kg
	Fuerza	56.29	ton
	Resistencia	73.182947	MPa
3	Diámetro	98.00	mm
	Altura	20.40	cm
	Masa	3.39	kg
	Fuerza	604.28	kN
	Resistencia	78.509509	MPa

Promedio 74.01 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas

sin CI:

30/04/2009

1	Diámetro	99.00 mm
	Altura	19.90 cm
	Masa	3.64 kg
	Fuerza	565.85 kN
	Resistencia	72.038909 MPa
2	Diámetro	99.00 mm
	Altura	20.05 cm
	Masa	3.71 kg
	Fuerza	47.82 ton
	Resistencia	60.921414 MPa
3	Diámetro	98.50 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.71 kg
	Fuerza	541.29 kN
	Resistencia	69.613543 MPa

Promedio

67.52 MPa

W/CM=0.425

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas

con CI:

20/04/2009

1	Diámetro	98.60	mm
	Altura	20.15	cm
	Masa	3.37	kg
	Fuerza	51.74	ton
	Resistencia	66.451286	MPa
2	Diámetro	98.59	mm
	Altura	19.90	cm
	Masa	3.31	kg
	Fuerza	45.69	ton
	Resistencia	58.692988	MPa
3	Diámetro	98.85	mm
	Altura	20.00	cm
	Masa	3.26	kg
	Fuerza	47.14	ton
	Resistencia	60.237512	MPa

Promedio 61.79 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas

sin CI:

20/04/2009

1	Diámetro	99.44 mm
	Altura	20.20 cm
	Masa	3.70 kg
	Fuerza	38.06 ton
	Resistencia	48.05929 MPa
2	Diámetro	98.54 mm
	Altura	20.20 cm
	Masa	3.67 kg
	Fuerza	38.03 ton
	Resistencia	48.902606 MPa
3	Diámetro	98.69 mm
	Altura	20.20 cm
	Masa	3.67 kg
	Fuerza	43.23 ton
	Resistencia	55.42041 MPa

Promedio 50.79 MPa

W/CM=0.45

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

11/05/2009

1	Diámetro	98.31	mm
	Altura	20.20	cm
	Masa	3.31	kg
	Fuerza	517.86	kN
	Resistencia	66.857967	MPa
2	Diámetro	97.90	mm
	Altura	20.00	cm
	Masa	3.28	kg
	Fuerza	507.28	kN
	Resistencia	66.041747	MPa
3	Diámetro	98.37	mm
	Altura	20.10	cm
	Masa	3.29	kg
	Fuerza	522.69	kN
	Resistencia	67.399247	MPa

Promedio 66.77 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
sin CI:

04/05/2009

1	Diámetro	98.11 mm
	Altura	20.38 cm
	Masa	3.58 kg
	Fuerza	410.46 kN
	Resistencia	53.208435 MPa
2	Diámetro	97.68 mm
	Altura	20.30 cm
	Masa	3.59 kg
	Fuerza	357.65 kN
	Resistencia	46.771696 MPa
3	Diámetro	97.75 mm
	Altura	20.32 cm
	Masa	3.58 kg
	Fuerza	361.96 kN
	Resistencia	47.267566 MPa

Promedio 49.08 MPa

W/CM=0.475

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

27/04/2009

1	Diámetro	98.78	mm
	Altura	20.10	cm
	Masa	3.71	kg
	Fuerza	44.7	ton
	Resistencia	57.200559	MPa
2	Diámetro	99.29	mm
	Altura	20.25	cm
	Masa	3.73	kg
	Fuerza	39.97	ton
	Resistencia	50.623704	MPa
3	Diámetro	98.73	mm
	Altura	20.20	cm
	Masa	3.67	kg
	Fuerza	45.49	ton
	Resistencia	58.270461	MPa

Promedio 55.36 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
sin CI:

27/04/2009

1	Diámetro	99.17 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.29 kg
	Fuerza	41.79 ton
	Resistencia	53.056982 MPa
2	Diámetro	98.44 mm
	Altura	20.15 cm
	Masa	3.23 kg
	Fuerza	36.25 ton
	Resistencia	46.708465 MPa
3	Diámetro	99.70 mm
	Altura	20.20 cm
	Masa	3.25 kg
	Fuerza	34 ton
	Resistencia	42.708999 MPa

Promedio 47.49 MPa

W/CM=0.5

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

11/05/2009

1	Diámetro	98.90	mm
	Altura	20.20	cm
	Masa	3.31	kg
	Fuerza	502.69	kN
	Resistencia	64.127433	MPa
2	Diámetro	98.73	mm
	Altura	20.15	cm
	Masa	3.32	kg
	Fuerza	472.63	kN
	Resistencia	60.500534	MPa
3	Diámetro	98.63	mm
	Altura	20.30	cm
	Masa	3.33	kg
	Fuerza	475.07	kN
	Resistencia	60.936251	MPa

Promedio 61.85 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
sin CI:

04/05/2009

1	Diámetro	98.63 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.64 kg
	Fuerza	428.49 kN
	Resistencia	54.961531 MPa
2	Diámetro	98.75 mm
	Altura	20.00 cm
	Masa	3.65 kg
	Fuerza	443.34 kN
	Resistencia	56.728187 MPa
3	Diámetro	98.98 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.65 kg
	Fuerza	417.94 kN
	Resistencia	53.229849 MPa

Promedio 54.97 MPa

Permeabilidad a los iones cloruros

0.4 CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	62	75.7	79.3	82.6	86	88.7	91.7	93.9	95.7	97.1	99.6	100	99.7
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	61.8	62.4	67.6	70.8	73.7	75.0	77.0	78.4	80.2	81.8	82.6	83.1	83.0
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	1928	1812
Probeta 2	1629	1531

0.4 SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	79.2	70	65.4	62.3	57.52	60	59.7	53.7	60.3	47.1	46.3	47	49.1
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	77.5	95.6	103.2	109.2	114.4	119.2	122.1	125.1	125.4	126.7	126.8	126.9	126.5
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	1248	1173
Probeta 2	2514	2362

0.425 CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	106.1	118.3	130.6	135.7	140.6	144.4	148.1	150.6	157.3	158.5	159.0	157.4	155.3
Minuto	0.0	30.0	60.0	90.0	120.0	150.0	180.0	210.0	240.0	270.0	300.0	330.0	360.0

Probeta 2

Intensidad (mA)	97.1	114.8	121.5	128.1	133.6	139.5	142.7	146.4	148.1	147.6	145.1	145.2	144.9
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga	
	Carga (Coulombs)	Corregida
Probeta 1	3116	2928
Probeta 2	2940	2763

0.425 SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	125.0	136.1	146.0	154.4	162.6	169.0	173.5	176.6	179.1	180.7	181.1	181.3	181.6
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	124.5	132.0	138.1	148.2	153.0	159.4	164.7	166.4	169.4	170.9	171.6	172.4	176.3
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga	Carga
	(Coulombs)	Corregida
Probeta 1	3589	3372
Probeta 2	3414	3208

0.45 CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	63.8	72.6	71.3	74.2	80.7	77.1	75.7	63.3	85.3	85.9	89.4	88.9	100.1
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	61.0	66.0	64.7	64.4	67.1	71.9	74.4	81.2	84.3	91.4	89.6	96.6	95.8
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	1703	1601
Probeta 2	1674	1573

0.45 SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	83.6	85.6	120.5	131.4	144.8	144.1	158.8	15.9	163.4	184.1	189.0	186.8	192.5
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	110.5	125.9	152.4	172.2	176.2	188.2	195.4	194.2	198.6	201.5	201.1	201.7	203.5
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	2992	2812
Probeta 2	3896	3661

0.475 CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	94.4	111.5	120.8	128.4	133.1	141.3	149.5	151.4	153.3	157.2	157.8	157.4	156.6
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	93.4	104.1	109.7	112.2	117.1	123.5	126.6	131.2	130.3	134.2	122.9	123.9	124.3
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	3037	2854
Probeta 2	2600	2443

0.475 SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	118.5	139.8	145.6	151.5	155.0	157.7	163.1	164.7	157.8	155.6	152.6	151.3	150.6
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	117.4	130.6	139.1	147.4	154.6	160.6	164.3	168.1	170.3	171.6	173.5	147.1	173.8
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	3293	3094
Probeta 2	3371	3168

0.5 CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	97.8	91.8	69.5	68.9	65.2	78.2	87.9	92.2	95.2	108.5	114.3	114.1	110.6
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	67.3	60.7	73.4	73.6	77.1	78.3	71.0	64.9	62.6	67.5	67.1	67.7	68.5
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Carga**(Coulombs)****Carga Corregida**

Probeta 1

1962**1844**

Probeta 2

1497**1407**0.5 SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	100.2	106.6	98.9	114.0	128.8	133.7	159.9	169.6	170.2	177.6	183.9	184.4	186.0
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	117.7	141.5	155.4	167.9	177.2	188.1	194.1	198.1	199.0	199.5	200.4	200.9	199.7
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Carga (Coulombs)**Carga Corregida**

Probeta 1

3187**2995**

Probeta 2

3925**3689**

Loss on ignition

	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Pérdida por Ignición (g/g)	Promedio	Proporción (21,2%)
<u>Cemento Portland Puro</u>							
Muestra 1	235.52	265.55	265.2	264.27	0.031	0.029	0.006
Muestra 2	201.48	231.27	230.95	230.17	0.026		

	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Pérdida por Ignición (g/g)	
<u>Gravilla</u>						Promedio
Muestra 1	162.88	196.98	196.78	195.65	0.033	0.034
Muestra 2	156.31	185.50	185.35	184.37	0.034	
<u>Arena</u>						
Muestra 1	201.25	231.94	231.70	230.45	0.041	0.041
Muestra 2	163.19	196.95	196.67	195.33	0.040	

	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Pérdida por Ignición (g/g)	Promedio
<u>Arcilla Expandida arena</u>						
Muestra 1	201.17	230.82	230.82	230.73	0.003	0.00706
Muestra 2	201.32	231.91	231.91	231.80	0.004	
Muestra 3	189.71	219.68	219.98	219.54	0.015	

<u>0.4 CCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	200.86	234.33	233.21	231.28	3.35%	1.070	4.651	7.096	65.54%
Probeta 2	190.01	224.53	223.31	221.42	3.53%	1.002	4.355	7.318	59.51%
Probeta 3	198.16	230.41	229.30	227.58	3.44%	0.888	3.860	6.837	56.46%
Mixta	200.86	234.33	233.21	231.28	3.35%	1.070	4.651	7.096	65.54%
				Promedio	3.42%	1.01	4.38	7.09	61.76%
				Prom-Min	0.07%	0.12	0.52	0.25	5.30%
				Max-Prom	0.12%	0.06	0.27	0.23	3.78%
				CV	2.64%	8.51%	8.51%	2.78%	7.34%

<u>0.4 SCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	201.54	234.01	232.83	231.09	3.63%	0.730	3.173	6.884	46.09%
Probeta 2	201.4	232.84	231.6	229.82	3.94%	0.808	3.515	6.665	52.73%
Probeta 3	197.53	233.49	232.41	230.67	3.00%	0.607	2.639	7.624	34.62%
Mixta	201.4	232.84	231.6	229.82	3.94%	0.808	3.515	6.665	52.73%
				Promedio	3.63%	0.74	3.21	6.96	46.55%
				Prom-Min	0.63%	0.13	0.57	0.29	11.92%
				Max-Prom	0.31%	0.07	0.30	0.66	6.19%
				CV	12.21%	12.88%	12.88%	6.53%	18.36%

<u>0.425 CCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	222.06	266.81	265.89	262.87	2.06%	1.873	8.145	9.487	85.85%
Probeta 2	238.18	268.45	267.58	265.89	2.87%	0.911	3.962	6.417	61.75%
Probeta 3	235.81	278.88	277.80	275.18	2.51%	1.514	6.581	9.131	72.08%
Mixta	227.52	258.43	257.74	256.02	2.23%	0.919	3.996	6.553	60.99%
					Promedio	2.42%	1.30	5.67	70.17%
					Prom-Min	0.36%	0.39	1.71	9.18%
					Max-Prom	0.46%	0.57	2.47	15.68%
					CV	14.76%	36.24%	36.24%	20.74%
								16.56%	

<u>0.425 SCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	193.71	228.51	227.29	225.31	3.51%	0.926	4.028	7.378	54.60%
Probeta 2	190.36	224.77	223.67	221.85	3.20%	0.770	3.348	7.295	45.90%
Probeta 3									
Mixta	198.42	229.83	228.69	227.05	3.63%	0.685	2.980	6.659	44.75%
					Promedio	3.44%	0.79	3.45	48.42%
					Prom-Min	0.25%	0.11	0.47	3.66%
					Max-Prom	0.19%	0.13	0.58	6.18%
					CV	6.47%	15.40%	15.40%	5.53%
								11.12%	

<u>0.45 CCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	201.14	248.32	247.21	244.57	2.35%	1.427	6.202	10.002	62.01%
Probeta 2	201.51	236.38	235.24	233.45	3.27%	0.898	3.903	7.392	52.79%
Probeta 3	193.41	234.32	232.98	230.41	3.28%	1.536	6.679	8.673	77.01%
Mixta	197.36	243.21	242.06	239.29	2.51%	1.598	6.950	9.720	71.50%
					Promedio	2.85%	1.36	5.93	65.83%
					Prom-Min	0.50%	0.47	2.03	13.04%
					Max-Prom	0.42%	0.23	1.02	11.18%
					CV	17.19%	23.41%	23.41%	13.23%

<u>0.45 SCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	193.36	227.62	226.53	224.7	3.18%	0.790	3.434	7.263	47.28%
Probeta 2	227.26	259.02	258.01	256.33	3.18%	0.715	3.110	6.733	46.18%
Probeta 3	189.85	221.24	220.21	218.53	3.28%	0.728	3.166	6.655	47.57%
Mixta	193.44	226.13	225.04	223.05	3.33%	1.007	4.380	6.930	63.19%
					Promedio	3.24%	0.81	3.52	51.06%
					Prom-Min	0.06%	0.09	0.41	4.87%
					Max-Prom	0.09%	0.20	0.86	12.14%
					CV	2.36%	16.72%	16.72%	3.93%

0.475 CCI										
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación	
Probeta 1	200.93	230.71	229.60	227.84	3.73%	1.012	4.400	6.313	69.69%	
Probeta 2	190.10	215.65	214.40	212.92	4.89%	0.846	3.676	5.417	67.87%	
Probeta 3	198.21	229.42	228.24	226.42	3.78%	1.036	4.503	6.617	68.06%	
Mixta	193.57	225.02	223.91	222.02	3.53%	1.099	4.779	6.667	71.67%	
					Promedio	3.98%	1.00	4.34	6.25	69.32%
					Prom-Min	0.45%	0.15	0.66	0.84	1.45%
					Max-Prom	0.91%	0.10	0.44	0.41	2.35%
					CV	15.47%	10.83%	10.83%	9.27%	2.54%

0.475 SCI									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	190.19	222.31	221.25	219.41	3.30%	1.035	4.500	6.809	66.09%
Probeta 2	201.33	235.02	233.93	232.07	3.24%	1.013	4.405	7.142	61.67%
Probeta 3	227.36	260.97	259.85	258.19	3.33%	0.811	3.525	7.125	49.47%
Mixta	235.65	264.98	263.82	262.26	3.95%	0.827	3.595	6.218	57.82%
				Promedio	3.46%	0.92	4.01	6.82	58.76%
				Prom-Min	0.22%	0.11	0.48	0.61	9.30%
				Max-Prom	0.50%	0.11	0.49	0.32	7.32%
				CV	9.70%	12.92%	12.92%	6.33%	12.01%

<u>0.5 CCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	197.27	228.62	227.61	225.76	3.22%	1.063	4.620	6.646	69.51%
Probeta 2	200.78	234.93	233.95	231.91	2.87%	1.180	5.129	7.240	70.84%
Probeta 3									
Mixta	190.09	222.27	221.31	219.53	2.98%	0.966	4.201	6.822	61.58%
					Promedio	3.02%	1.07	4.65	67.31%
					Prom-Min	0.16%	0.10	0.45	5.73%
					Max-Prom	0.20%	0.11	0.48	3.53%
					CV	5.94%	9.99%	9.99%	4.42%

<u>0.5 SCI</u>									
	Crisoles	Inicial	105 °C	1.050 °C	Agua Capilar (%)	Agua No Evaporable (g)	Cemento Hidratado (g)	Cemento Total (g)	Grado De Hidratación
Probeta 1	200.82	248.66	247.52	244.93	2.38%	1.139	4.950	10.142	48.81%
Probeta 2	198.12	240.72	239.54	237.2	2.77%	1.054	4.583	9.031	50.75%
Probeta 3	193.48	233.98	232.82	230.75	2.86%	0.844	3.668	8.586	42.72%
Mixta	189.91	236.21	235.13	232.39	2.33%	1.342	5.836	9.816	59.45%
					Promedio	2.59%	1.09	4.76	50.43%
					Prom-Min	0.25%	0.25	1.09	7.71%
					Max-Prom	0.28%	0.25	1.08	9.02%
					CV	10.39%	18.86%	18.86%	7.58%

Análisis modelo de Powers

W/CM_{real} 0.4

SCI			CCI		
α_{real}	46.6%	$W_{perdida}$	α_{real}	61.8%	$W_{perdida}$
$\alpha_{teórico}$	46.5%		$\alpha_{teórico}$	61.8%	
$\rho_{\alpha máx}$	33.9%	Cemento en m ³	$\rho_{\alpha máx}$	40.5%	Cemento en m ³
$\rho_{teórico}$	33.8%		$\rho_{teórico}$	40.4%	
$W/CM_{teórico}$	0.165		$W/CM_{teórico}$	0.219	
		94.59			72.81
		402.5			402.5

W/CM_{real} 0.425

SCI			CCI		
α_{real}	48.4%	$W_{perdida}$	α_{real}	70.2%	$W_{perdida}$
$\alpha_{teórico}$	48.4%		$\alpha_{teórico}$	70.2%	
$\rho_{\alpha máx}$	34.8%	Cemento en m ³	$\rho_{\alpha máx}$	43.6%	Cemento en m ³
$\rho_{teórico}$	34.8%		$\rho_{teórico}$	43.6%	
$W/CM_{teórico}$	0.172		$W/CM_{teórico}$	0.249	
		98.42			68.46
		389.0			389.0

W/CM_{real} 0.45

SCI			CCI		
α_{real}	51.1%	$W_{perdida}$	α_{real}	65.8%	$W_{perdida}$
$\alpha_{teórico}$	50.1%		$\alpha_{teórico}$	65.8%	
$\rho_{\alpha máx}$	35.5%	Cemento en m ³	$\rho_{\alpha máx}$	42.0%	Cemento en m ³
$\rho_{teórico}$	35.5%		$\rho_{teórico}$	42.0%	
$W/CM_{teórico}$	0.178		$W/CM_{teórico}$	0.234	
		102.60			81.51
		376.7			376.7

W/CM_{real} 0.475

SCI			CCI		
α_{real}	58.76%	$W_{perdida}$	α_{real}	69.32%	$W_{perdida}$
$\alpha_{teórico}$	59.75%	95.79	$\alpha_{teórico}$	69.31%	83.40
$p_{\alpha máx}$	39.66%	Cemento en m ³	$p_{\alpha máx}$	43.26%	Cemento en m ³
$p_{teórico}$	39.66%		$p_{teórico}$	43.27%	
$W/CM_{teórico}$	0.212	364.2	$W/CM_{teórico}$	0.246	364.2

W/CM_{real} 0.5

SCI			CCI		
α_{real}	50.43%	$W_{perdida}$	α_{real}	61.58%	$W_{perdida}$
$\alpha_{teórico}$	50.43%	113.63	$\alpha_{teórico}$	61.57%	99.65
$p_{\alpha máx}$	35.68%	Cemento en m ³	$p_{\alpha máx}$	40.38%	Cemento en m ³
$p_{teórico}$	35.69%		$p_{teórico}$	40.38%	
$W/CM_{teórico}$	0.179	354.0	$W/CM_{teórico}$	0.2185	354.0

b) Objetivo ii)

Resistencia a la compresión

W/CM=0.3 con 0% puzolanas naturales

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

1	Diámetro	98.80 mm
	Altura	19.90 cm
	Masa	3.76 kg
	Fuerza	67.10 ton
	Resistencia	85.83 MPa
2	Diámetro	99.10 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.81 kg
	Fuerza	62.40 ton
	Resistencia	79.34 MPa
3	Diámetro	98.30 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.79 kg
	Fuerza	65.90 ton
	Resistencia	85.15 MPa

Promedio 83.44 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
sin CI:

1	Diámetro	98.75 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.68 kg
	Fuerza	61.7 ton
	Resistencia	79.00 MPa
2	Diámetro	98.44 mm
	Altura	20.12 cm
	Masa	3.68 kg
	Fuerza	61.5 ton
	Resistencia	79.24 MPa
3	Diámetro	97.88 mm
	Altura	19.88 cm
	Masa	3.69 kg
	Fuerza	63.5 ton
	Resistencia	82.76 MPa

Promedio 80.34 MPa

W/CM=0.3 con 13% puzolanas naturales

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

1	Diámetro	98.20 mm
	Altura	19.95 cm
	Masa	3.74 kg
	Fuerza	65.40 ton
	Resistencia	84.68 MPa
2	Diámetro	97.80 mm
	Altura	19.80 cm
	Masa	3.72 kg
	Fuerza	61.80 ton
	Resistencia	80.68 MPa
3	Diámetro	98.40 mm
	Altura	20.00 cm
	Masa	3.78 kg
	Fuerza	68.00 ton
	Resistencia	87.69 MPa

Promedio 84.35 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
sin CI:

1	Diámetro	98.87 mm
	Altura	20.10 cm
	Masa	3.66 kg
	Fuerza	65.69 ton
	Resistencia	83.91 MPa
2	Diámetro	98.34 mm
	Altura	20.12 cm
	Masa	3.66 kg
	Fuerza	66.68 ton
	Resistencia	86.09 MPa
3	Diámetro	97.95 mm
	Altura	19.88 cm
	Masa	3.66 kg
	Fuerza	67.19 ton
	Resistencia	87.44 MPa

Promedio 85.81 MPa

W/CM=0.3 con 26% puzolanas naturales

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

1	Diámetro	98.60 mm
	Altura	20.00 cm
	Masa	3.72 kg
	Fuerza	57.96 ton
	Resistencia	74.44 MPa
2	Diámetro	99.00 mm
	Altura	20.40 cm
	Masa	3.77 kg
	Fuerza	67.91 ton
	Resistencia	86.52 MPa
3	Diámetro	98.00 mm
	Altura	20.30 cm
	Masa	3.74 kg
	Fuerza	61.55 ton
	Resistencia	80.02 MPa

Promedio 80.33 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
sin CI:

1	Diámetro	98.80 mm
	Altura	19.90 cm
	Masa	3.58 kg
	Fuerza	57.75 ton
	Resistencia	73.87 MPa
2	Diámetro	98.50 mm
	Altura	20.20 cm
	Masa	3.60 kg
	Fuerza	58.86 ton
	Resistencia	75.75 MPa
3	Diámetro	98.50 mm
	Altura	19.95 cm
	Masa	3.56 kg
	Fuerza	55.42 ton
	Resistencia	71.32 MPa

Promedio 73.65 MPa

W/CM=0.3 con 39% puzolanas naturales

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas
con CI:

1	Diámetro	98.20 mm
	Altura	20.20 cm
	Masa	3.72 kg
	Fuerza	52.72 ton
	Resistencia	68.26 MPa
2	Diámetro	98.80 mm
	Altura	20.18 cm
	Masa	3.73 kg
	Fuerza	52.62 ton
	Resistencia	67.31 MPa
3	Diámetro	98.60 mm
	Altura	20.25 cm
	Masa	3.73 kg
	Fuerza	57.95 ton
	Resistencia	74.43 MPa

Promedio 70.00 MPa

ENSAYOS RESISTENCIA 90 DÍAS

Probetas sin
CI:

1	Diámetro	99.00	mm
	Altura	20.01	cm
	Masa	3.55	kg
	Fuerza	57.01	ton
	Resistencia	72.629231	MPa
2	Diámetro	98.00	mm
	Altura	20.05	cm
	Masa	3.55	kg
	Fuerza	54.93	ton
	Resistencia	71.414803	MPa
3	Diámetro	98.60	mm
	Altura	19.98	cm
	Masa	3.56	kg
	Fuerza	56.12	ton
	Resistencia	72.076656	MPa

Promedio 72.04 MPa

Permeabilidad a los iones cloruros

0% SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	47.8	48.4	49.6	49.4	51.6	52.3	53.5	53.9	53.6	52.7	52.8	52.9	52.8
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	38.8	39.9	41.9	43.5	44.1	45.6	45.5	45.4	45.5	44.7	44.5	44.4	44.1
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	1118	1050
Probeta 2	948	890

0% CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	46.3	45.9	46.6	46.8	47.3	49.5	49.9	49.7	50.5	50.1	50.4	50.2	50.4
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	50.2	51.1	51.8	52.0	53.2	52.9	53.1	53.1	53.7	53.5	53.3	53.1	53.2
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	1053	990
Probeta 2	1139	1070

13%SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	34.5	36.8	44.3	46.5	42.1	47.3	46.5	40.3	45.3	40.5	41.3	42.2	43.9
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	31.3	34.2	32.7	36.7	39.1	40.2	41.5	43.2	42.4	41.5	41.9	41.3	42.8
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

		Carga
	Carga (Coulombs)	Corregida
Probeta 1	922	867
Probeta 2	849	798

13%CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	38.5	40.1	41.3	41.7	42.3	43.1	42.1	41.2	45.2	44.5	42.1	43.5	44.7
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	30.1	31.2	33.4	34.8	35.4	36.7	37.4	37.6	36.9	34.7	35.7	34.4	33.9
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

		Carga
	Carga (Coulombs)	Corregida
Probeta 1	916	860
Probeta 2	756	711

26%SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	20.6	14.1	16.3	18.8	19.8	20.7	18.4	21.2	22.8	26.0	26.7	25.4	24.5
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	29.3	31.0	30.6	31.2	31.7	31.2	31.7	31.9	31.2	31.2	32.1	32.8	31.7
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	455	427
Probeta 2	679	638

26%CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	32.4	32.4	31.6	31.6	31.8	31.8	32.0	32.3	32.4	32.5	32.5	32.5	32.5
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	28.2	28.2	27.5	27.4	27.7	27.6	27.8	28.1	28.2	28.2	28.3	28.3	28.3
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	694	653
Probeta 2	604	567

39%SC

Probeta 1

Intensidad (mA)	17.6	13.1	13.6	13.5	15.5	16.9	17.4	17.4	16.4	27.2	29.6	24.4	9.8
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	13.1	14.2	14.5	14.5	14.7	15.0	15.5	15.4	15.7	15.6	15.2	15.7	15.3
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	393	370
Probeta 2	324	305

39%CC

Probeta 1

Intensidad (mA)	16.5	16.6	17.5	17.3	17.6	16.7	16.7	16.5	16.6	17.5	17.3	17.6	16.7
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

Probeta 2

Intensidad (mA)	14.8	15.2	15.8	15.8	15.8	15.3	15.0	15.1	14.9	16.0	15.5	15.8	15.3
Minuto	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360

	Carga (Coulombs)	Carga Corregida
Probeta 1	368	346
Probeta 2	334	313

Retracción autógena

0%SC

Cast			10/6/09									
2:15	Zero	0.41										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
10/6/09	12:00	0.00	0	-1.133	-1.229	-1.257	3.355	3.292	3.425	3.185	3.135	3.175
10/6/09	12:30	0.02	0.5	-1.145	-1.246	-1.264	3.375	3.270	3.389	3.222	3.173	3.210
10/6/09	13:00	0.04	1	-1.144	-1.240	-1.261	3.367	3.268	3.381	3.230	3.185	3.220
10/6/09	15:00	0.13	3	-1.131	-1.232	-1.256	3.371	3.262	3.375	3.242	3.203	3.238
10/7/09	12:00	1.00	1	-1.221	-1.314	-1.344	3.274	3.164	3.282	3.139	3.099	3.137
10/8/09	12:00	2.00	2	-1.254	-1.325	-1.383	3.235	3.149	3.238	3.104	3.056	3.098
10/9/09	12:00	3.00	3	-1.293	-1.391	-1.419	3.197	3.119	3.197	3.065	3.022	3.060
10/13/09	11:15	6.97	7	-1.366	-1.474	-1.482	3.102	3.008	3.113	2.993	2.947	2.986
10/15/09	10:40	8.94	9	-1.405	-1.508	-1.522	3.065	2.973	3.071	2.958	2.911	2.953
10/19/09	12:20	13.01	13	-1.450	-1.541	-1.569	3.022	2.931	3.028	2.926	2.879	2.919
10/26/09	10:55	19.95	20	-1.478	-1.560	-1.597	2.992	2.903	2.997	2.899	2.852	2.890
10/29/09	11:25	22.98	23	-1.474	-1.567	-1.601	2.989	2.898	2.995	2.892	2.846	2.885
11/2/09	10:45	26.95	27	-1.474	-1.574	-1.603	2.986	2.883	2.988	2.891	2.848	2.885
11/6/09	12:00	31.00	31	-1.473	-1.586	-1.613	2.979	2.862	2.971	2.889	2.838	2.878
11/10/09	13:20	35.06	35	-1.483	-1.580	-1.602	2.961	2.878	2.971	2.890	2.846	2.884
11/12/09	11:35	36.98	37	-1.484	-1.587	-1.603	2.955	2.856	2.964	2.885	2.835	2.875
11/16/09	11:35	40.98	41	-1.489	-1.587	-1.607	2.951	2.856	2.957	2.885	2.838	2.875

0%SC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
306.707	306.611	306.583	310.885	310.822	310.955	310.605	310.555	310.595
306.695	306.594	306.576	310.905	310.800	310.919	310.642	310.593	310.630
306.696	306.600	306.579	310.897	310.798	310.911	310.650	310.605	310.640
306.709	306.608	306.584	310.901	310.792	310.905	310.662	310.623	310.658
306.619	306.526	306.496	310.804	310.694	310.812	310.559	310.519	310.557
306.586	306.515	306.457	310.765	310.679	310.768	310.524	310.476	310.518
306.547	306.449	306.421	310.727	310.649	310.727	310.485	310.442	310.480
306.474	306.366	306.358	310.632	310.538	310.643	310.413	310.367	310.406
306.435	306.332	306.318	310.595	310.503	310.601	310.378	310.331	310.373
306.390	306.299	306.271	310.552	310.461	310.558	310.346	310.299	310.339
306.362	306.280	306.243	310.522	310.433	310.527	310.319	310.272	310.310
306.366	306.273	306.239	310.519	310.428	310.525	310.312	310.266	310.305
306.366	306.266	306.237	310.516	310.413	310.518	310.311	310.268	310.305
306.367	306.254	306.227	310.509	310.392	310.501	310.309	310.258	310.298
306.357	306.260	306.238	310.491	310.408	310.501	310.310	310.266	310.304
306.356	306.253	306.237	310.485	310.386	310.494	310.305	310.255	310.295
306.351	306.253	306.233	310.481	310.386	310.487	310.305	310.258	310.295

0%SC

Retracción Real ($\mu\epsilon$)									1	2	3	Prom
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	55	23	-64	71	116	-119	-122	-113	39	41	-118	13
36	36	13	-39	77	141	-145	-161	-145	28	60	-150	21
-7	10	-3	-51	97	161	-184	-219	-203	0	69	-202	44
287	277	284	261	412	460	148	116	122	283	377	129	-263
395	313	411	386	460	601	261	254	248	373	482	254	-370
522	528	528	508	557	733	386	364	370	526	599	373	-500
760	799	734	814	914	1003	618	605	609	764	910	611	-762
887	910	864	933	1026	1138	731	721	715	887	1033	722	-881
1034	1018	1018	1071	1161	1277	834	824	824	1023	1170	827	-1007
1125	1080	1109	1168	1252	1376	921	911	918	1104	1265	917	-1095
1112	1102	1122	1177	1268	1383	943	931	934	1112	1276	936	-1108
1112	1125	1129	1187	1316	1405	947	924	934	1122	1303	935	-1120
1109	1164	1161	1209	1383	1460	953	956	956	1145	1351	955	-1150
1141	1145	1125	1267	1332	1460	950	931	937	1137	1353	939	-1143
1144	1168	1129	1287	1403	1483	966	966	966	1147	1391	966	-1168
1161	1168	1142	1300	1403	1505	966	956	966	1157	1402	963	-1174

0%CC

Cast			9/9/09									
2:45	Zero	0.43										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
9/9/09	13:00	0.00	0	6.426	6.482	6.492	3.116	3.094	3.227	2.380	2.344	2.507
9/9/09	13:30	0.02	0.5	6.585	6.567	6.581	3.202	3.103	3.132	2.453	2.487	2.344
9/9/09	14:00	0.04	1	6.610	6.640	6.681	3.129	3.092	3.221	2.401	2.417	2.514
9/9/09	16:00	0.13	3	6.747	6.771	6.793	3.256	3.263	3.141	2.410	2.441	2.546
9/10/09	13:00	1.00	1	6.913	6.744	6.696	3.205	3.259	3.178	2.553	2.435	2.430
9/11/09	16:00	2.13	2	6.825	6.881	6.673	3.252	3.109	3.143	2.528	2.480	2.361
9/14/09	16:00	5.13	5	6.783	6.853	6.624	3.205	3.054	3.078	2.480	2.441	2.317
9/16/09	16:00	7.13	7	6.745	6.826	6.594	3.169	3.018	3.046	2.444	2.413	2.282
9/21/09	16:30	12.15	12	6.649	6.716	6.496	3.065	2.911	2.926	2.347	2.319	2.182
9/23/09	15:00	14.08	14	6.618	6.697	6.479	3.054	2.907	2.925	2.323	2.303	2.180
9/25/09	13:40	16.03	16	6.638	6.713	6.496	3.064	2.913	2.941	2.329	2.301	2.180
9/28/09	15:40	19.11	19	6.612	6.710	6.469	3.034	2.885	2.914	2.300	2.267	2.145
10/5/09	13:20	26.01	26	6.586	6.659	6.443	3.008	2.861	2.881	2.268	2.244	2.109
10/7/09	12:15	27.97	28	6.581	6.645	6.435	2.996	2.855	2.873	2.258	2.232	2.111
10/9/09	11:05	29.92	30	6.572	6.652	6.435	2.996	2.854	2.875	2.258	2.232	2.108
10/13/09	10:25	33.89	34	6.568	6.649	6.429	2.992	2.849	2.873	2.258	2.228	2.105
10/15/09	9:55	35.87	36	6.564	6.642	6.424	2.990	2.843	2.873	2.256	2.224	2.101
10/19/09	11:45	39.95	40	6.544	6.625	6.407	2.966	2.821	2.842	2.235	2.205	2.086
10/26/09	10:20	46.89	47	6.540	6.623	6.406	2.962	2.818	2.842	2.230	2.202	2.077
10/29/09	10:40	49.90	50	6.535	6.620	6.400	2.955	2.814	2.839	2.226	2.195	2.069
11/2/09	10:05	53.88	54	6.531	6.619	6.394	2.952	2.814	2.838	2.226	2.194	2.070
11/6/09	11:10	57.92	58	6.513	6.598	6.538	2.936	2.792	2.816	2.209	2.177	2.050
11/10/09	14:20	62.06	62	6.513	6.605	6.382	2.955	2.799	2.816	2.215	2.185	2.060
11/12/09	10:40	63.90	64	6.518	6.608	6.378	2.935	2.798	2.817	2.213	2.184	2.063

0%CC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
314.596	314.652	314.662	311.656	311.634	311.767	310.690	310.654	310.817
314.755	314.737	314.751	311.742	311.643	311.672	310.763	310.797	310.654
314.780	314.810	314.851	311.669	311.632	311.761	310.711	310.727	310.824
314.917	314.941	314.963	311.796	311.803	311.681	310.720	310.751	310.856
315.083	314.914	314.866	311.745	311.799	311.718	310.863	310.745	310.740
314.995	315.051	314.843	311.792	311.649	311.683	310.838	310.790	310.671
314.953	315.023	314.794	311.745	311.594	311.618	310.790	310.751	310.627
314.915	314.996	314.764	311.709	311.558	311.586	310.754	310.723	310.592
314.819	314.886	314.666	311.605	311.451	311.466	310.657	310.629	310.492
314.788	314.867	314.649	311.594	311.447	311.465	310.633	310.613	310.490
314.808	314.883	314.666	311.604	311.453	311.481	310.639	310.611	310.490
314.782	314.880	314.639	311.574	311.425	311.454	310.610	310.577	310.455
314.756	314.829	314.613	311.548	311.401	311.421	310.578	310.554	310.419
314.751	314.815	314.605	311.536	311.395	311.413	310.568	310.542	310.421
314.742	314.822	314.605	311.536	311.394	311.415	310.568	310.542	310.418
314.738	314.819	314.599	311.532	311.389	311.413	310.568	310.538	310.415
314.734	314.812	314.594	311.530	311.383	311.413	310.566	310.534	310.411
314.714	314.795	314.577	311.506	311.361	311.382	310.545	310.515	310.396
314.710	314.793	314.576	311.502	311.358	311.382	310.540	310.512	310.387
314.705	314.790	314.570	311.495	311.354	311.379	310.536	310.505	310.379
314.701	314.789	314.564	311.492	311.354	311.378	310.536	310.504	310.380
314.683	314.768	314.708	311.476	311.332	311.356	310.519	310.487	310.360
314.683	314.775	314.552	311.495	311.339	311.356	310.525	310.495	310.370
314.688	314.778	314.548	311.475	311.338	311.357	310.523	310.494	310.373

0%CC

Retracción Real (µε)												
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1	2	3	Prom
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-505	-270	-283	-276	-29	305	-235	-460	524	-353	0	-57	137
-585	-502	-601	-42	6	19	-68	-235	-23	-563	-5	-108	225
-1020	-918	-957	-449	-542	276	-97	-312	-125	-965	-239	-178	461
-1548	-833	-648	-286	-529	157	-557	-293	248	-1010	-219	-201	477
-1268	-1268	-575	-436	-48	269	-476	-438	470	-1037	-72	-148	419
-1135	-1179	-419	-286	128	478	-322	-312	611	-911	107	-8	271
-1014	-1093	-324	-170	244	581	-206	-222	724	-810	218	99	165
-709	-744	-13	164	587	965	106	80	1046	-488	572	411	-165
-610	-683	41	199	600	969	183	132	1052	-417	589	456	-209
-674	-734	-13	167	581	917	164	138	1052	-474	555	452	-178
-591	-725	73	263	671	1004	257	248	1165	-414	646	557	-263
-509	-563	156	347	748	1110	360	322	1280	-305	735	654	-361
-493	-518	181	385	767	1135	393	361	1274	-277	762	676	-387
-464	-540	181	385	770	1129	393	361	1284	-274	761	679	-389
-451	-531	200	398	786	1135	393	373	1293	-261	773	686	-400
-439	-508	216	404	805	1135	399	386	1306	-244	782	697	-412
-375	-454	270	481	876	1235	467	447	1354	-186	864	756	-478
-362	-448	273	494	886	1235	483	457	1383	-179	872	774	-489
-346	-439	292	517	898	1245	496	480	1409	-164	887	795	-506
-334	-435	311	526	898	1248	496	483	1406	-153	891	795	-511
-277	-369	-146	578	969	1318	550	538	1470	-264	955	853	-515
-277	-391	350	517	947	1318	531	512	1438	-106	927	827	-549
-292	-400	362	581	950	1315	538	515	1428	-110	949	827	-555

13%SC

Cast			9/9/09									
2:45	Zero	365.43										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
9/9/10	13:00	0.00	0				0.108	0.111	0.147	2.380	2.329	2.280
9/9/10	13:30	0.02	0.02				0.130	0.093	0.111	2.285	2.297	2.285
9/9/10	14:00	0.04	0.04				0.158	0.183	0.163	2.288	2.309	2.286
9/9/10	16:00	0.13	0.125				0.179	0.152	0.127	2.352	2.370	2.364
9/10/10	13:00	1.00	1				0.099	0.134	0.156	2.350	2.346	2.328
9/11/10	16:00	2.13	2				0.049	0.156	0.075	2.254	2.287	2.271
9/14/10	16:00	5.13	5				-0.005	0.083	0.031	2.216	2.248	2.232
9/16/10	16:00	7.13	7				-0.049	0.039	-0.017	2.169	2.202	2.187
9/21/10	16:30	12.15	12				-0.122	-0.044	-0.094	2.099	2.131	2.113
9/23/10	15:00	14.08	14				-0.130	-0.041	-0.099	2.093	2.129	2.113
9/25/10	13:40	16.03	16				-0.156	-0.069	-0.117	2.083	2.121	2.101
9/28/10	15:40	19.11	19				-0.166	-0.081	-0.136	2.074	2.108	2.087
10/5/10	13:20	26.01	26				-0.169	-0.076	-0.134	2.056	2.101	2.076
10/7/10	12:15	27.97	28				-0.168	-0.083	-0.133	2.057	2.091	2.075
10/9/10	11:05	29.92	30				-0.168	-0.089	-0.138	2.052	2.090	2.072
10/13/10	10:25	33.89	34				-0.176	-0.097	-0.149	2.045	2.080	2.061
10/15/10	9:55	35.87	36				-0.186	-0.104	-0.016	2.040	2.072	2.055
10/19/10	11:45	39.95	40				-0.201	-0.119	-0.174	2.022	2.054	2.038
10/26/10	10:20	46.89	47				-0.202	-0.121	-0.174	2.014	2.049	2.030
10/29/10	10:40	49.90	50				-0.202	-0.127	-0.184	2.013	2.047	2.028
11/2/10	10:05	53.88	54				-0.214	-0.138	-0.186	2.004	2.040	2.022
11/6/10	11:10	57.92	58				-0.222	-0.148	-0.201	2.201	2.040	2.019
11/10/10	14:20	62.06	62				-0.202	-0.132	-0.185	2.009	2.048	2.027
11/12/10	10:40	63.90	64				-0.206	-0.129	-0.186	2.012	2.050	2.028

13%SC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
			307.918	307.921	307.957	310.170	310.119	310.070
			307.940	307.903	307.921	310.075	310.087	310.075
			307.968	307.993	307.973	310.078	310.099	310.076
			307.989	307.962	307.937	310.142	310.160	310.154
			307.909	307.944	307.966	310.140	310.136	310.118
			307.859	307.966	307.885	310.044	310.077	310.061
			307.805	307.893	307.841	310.006	310.038	310.022
			307.761	307.849	307.793	309.959	309.992	309.977
			307.688	307.766	307.716	309.889	309.921	309.903
			307.680	307.769	307.711	309.883	309.919	309.903
			307.654	307.741	307.693	309.873	309.911	309.891
			307.644	307.729	307.674	309.864	309.898	309.877
			307.641	307.734	307.676	309.846	309.891	309.866
			307.642	307.727	307.677	309.847	309.881	309.865
			307.642	307.721	307.672	309.842	309.880	309.862
			307.634	307.713	307.661	309.835	309.870	309.851
			307.624	307.706	307.794	309.830	309.862	309.845
			307.609	307.691	307.636	309.812	309.844	309.828
			307.608	307.689	307.636	309.804	309.839	309.820
			307.608	307.683	307.626	309.803	309.837	309.818
			307.596	307.672	307.624	309.794	309.830	309.812
			307.588	307.662	307.609	309.991	309.830	309.809
			307.608	307.678	307.625	309.799	309.838	309.817
			307.604	307.681	307.624	309.802	309.840	309.818

13%SC

Retracción Real ($\mu\epsilon$)												
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1	2	3	Prom
			0	0	0	0	0	0	PROBETA ERRÓNEA LARGO MAYOR AL QUE SE PUEDE MEDIR	0	0	0
			-71	58	117	306	103	-16		35	131	-83
			-162	-234	-52	297	64	-19		-149	114	18
			-231	-133	65	90	-132	-271		-100	-104	102
			29	-75	-29	97	-55	-155		-25	-38	31
			192	-146	234	406	135	29		93	190	-142
			367	91	377	529	261	155		278	315	-297
			510	234	533	680	410	300		425	463	-444
			747	503	783	906	638	539		678	694	-686
			773	494	799	925	645	539		688	703	-696
			857	585	857	958	671	577		766	735	-751
			890	624	919	987	713	622		811	774	-792
			900	607	912	1045	735	658		806	813	-810
			896	630	909	1041	767	661		812	823	-818
			896	650	925	1057	771	671		824	833	-828
			922	675	961	1080	803	706		853	863	-858
			955	698	529	1096	829	726		727	884	-805
			1004	747	1042	1154	887	780		931	940	-936
			1007	753	1042	1180	903	806		934	963	-949
			1007	773	1075	1183	909	813		952	968	-960
			1046	809	1081	1212	932	832		979	992	-985
			1072	841	1130	577	932	842		1014	784	-899
			1007	789	1078	1196	906	816		958	973	-965
			1020	779	1081	1186	900	813		960	966	-963

13%CC

Cast			9/9/09									
2:45	Zero	365.43										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
9/9/10	13:00	0.00	0	5.137	5.302	5.124	6.498	6.458	6.445	6.408	6.561	6.416
9/9/10	13:30	0.02	0.5	5.189	5.329	5.242	6.471	6.564	6.475	6.437	6.519	6.508
9/9/10	14:00	0.04	1	5.246	5.353	5.282	6.665	6.528	6.475	6.452	6.635	6.589
9/9/10	16:00	0.13	3	5.266	5.284	5.351	6.531	6.643	6.566	6.583	6.679	6.631
9/10/10	13:00	1.00	1	5.324	5.226	5.029	6.468	6.577	6.659	6.478	6.500	6.593
9/11/10	16:00	2.13	2	5.317	5.389	5.207	6.557	6.443	6.558	6.413	6.508	6.579
9/14/10	16:00	5.13	5	5.304	5.376	5.187	6.415	6.506	6.540	6.383	6.465	6.511
9/16/10	16:00	7.13	7	5.212	5.318	5.127	6.477	6.352	6.441	6.334	6.419	6.481
9/21/10	16:30	12.15	12	5.157	5.225	5.100	6.377	6.265	6.356	6.265	6.376	6.416
9/23/10	15:00	14.08	14	5.136	5.209	5.018	6.380	6.255	6.336	6.265	6.348	6.400
9/25/10	13:40	16.03	16	5.141	5.207	5.032	6.364	6.245	6.336	6.253	6.340	6.397
9/28/10	15:40	19.11	19	5.128	5.185	4.997	6.332	6.219	6.302	6.233	6.314	6.374
10/5/10	13:20	26.01	26	5.060	5.169	4.985	6.330	6.205	6.306	6.211	6.301	6.362
10/7/10	12:15	27.97	28	5.091	5.161	4.980	6.322	6.198	6.286	6.215	6.298	6.333
10/9/10	11:05	29.92	30	5.084	5.161	4.976	6.330	6.197	6.281	6.215	6.294	6.366
10/13/10	10:25	33.89	34	5.085	5.161	4.976	6.314	6.191	6.275	6.205	6.290	6.353
10/15/10	9:55	35.87	36	5.094	5.159	4.976	6.314	6.185	6.277	6.203	6.286	6.350
10/19/10	11:45	39.95	40	5.080	5.142	4.967	6.304	6.171	6.273	6.177	6.259	6.326
10/26/10	10:20	46.89	47	5.064	5.128	4.961	6.288	6.157	6.237	6.173	6.255	6.318
10/29/10	10:40	49.90	50	5.052	5.119	4.949	6.281	6.154	6.233	6.167	6.247	6.316
11/2/10	10:05	53.88	54	5.054	5.108	4.938	6.262	6.142	6.227	6.154	6.244	6.311
11/6/10	11:10	57.92	58	5.035	5.096	4.922	6.257	6.132	6.223	6.148	6.233	6.293
11/10/10	14:20	62.06	62	5.035	5.095	4.920	6.257	6.132	6.224	6.148	6.233	6.300
11/12/10	10:40	63.90	64	5.034	5.096	4.919	6.257	6.132	6.225	6.147	6.233	6.302

13%CC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
313.177	313.342	313.164	314.668	314.628	314.615	314.268	314.421	314.276
313.229	313.369	313.282	314.641	314.734	314.645	314.297	314.379	314.368
313.286	313.393	313.322	314.835	314.698	314.645	314.312	314.495	314.449
313.306	313.324	313.391	314.701	314.813	314.736	314.443	314.539	314.491
313.364	313.266	313.069	314.638	314.747	314.829	314.338	314.360	314.453
313.357	313.429	313.247	314.727	314.613	314.728	314.273	314.368	314.439
313.344	313.416	313.227	314.585	314.676	314.710	314.243	314.325	314.371
313.252	313.358	313.167	314.647	314.522	314.611	314.194	314.279	314.341
313.197	313.265	313.140	314.547	314.435	314.526	314.125	314.236	314.276
313.176	313.249	313.058	314.550	314.425	314.506	314.125	314.208	314.260
313.181	313.247	313.072	314.534	314.415	314.506	314.113	314.200	314.257
313.168	313.225	313.037	314.502	314.389	314.472	314.093	314.174	314.234
313.100	313.209	313.025	314.500	314.375	314.476	314.071	314.161	314.222
313.131	313.201	313.020	314.492	314.368	314.456	314.075	314.158	314.193
313.124	313.201	313.016	314.500	314.367	314.451	314.075	314.154	314.226
313.125	313.201	313.016	314.484	314.361	314.445	314.065	314.150	314.213
313.134	313.199	313.016	314.484	314.355	314.447	314.063	314.146	314.210
313.120	313.182	313.007	314.474	314.341	314.443	314.037	314.119	314.186
313.104	313.168	313.001	314.458	314.327	314.407	314.033	314.115	314.178
313.092	313.159	312.989	314.451	314.324	314.403	314.027	314.107	314.176
313.094	313.148	312.978	314.432	314.312	314.397	314.014	314.104	314.171
313.075	313.136	312.962	314.427	314.302	314.393	314.008	314.093	314.153
313.075	313.135	312.960	314.427	314.302	314.394	314.008	314.093	314.160
313.074	313.136	312.959	314.427	314.302	314.395	314.007	314.093	314.162

13%CC

Retracción Real (µε)												
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1	2	3	Prom
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-166	-86	-377	86	-337	-95	-92	134	-293	-210	-115	-84	136
-348	-163	-505	-531	-222	-95	-140	-235	-550	-338	-283	-309	310
-412	57	-725	-105	-588	-385	-557	-375	-684	-360	-359	-539	419
-597	243	303	95	-378	-680	-223	194	-563	-17	-321	-197	178
-575	-278	-265	-187	48	-359	-16	169	-519	-372	-166	-122	220
-533	-236	-201	264	-153	-302	80	305	-302	-324	-64	28	120
-239	-51	-10	67	337	13	235	452	-207	-100	139	160	-66
-64	246	77	385	613	283	455	588	0	86	427	348	-287
3	297	338	375	645	346	455	677	51	213	456	394	-354
-13	303	294	426	677	346	493	703	60	195	483	419	-366
29	373	406	528	760	455	557	786	134	269	581	492	-447
246	424	444	534	804	442	627	827	172	371	593	542	-502
147	450	460	559	826	505	614	836	264	352	630	572	-518
169	450	473	534	830	521	614	849	159	364	628	541	-511
166	450	473	585	849	540	646	862	200	363	658	569	-530
137	456	473	585	868	534	652	875	210	355	662	579	-532
182	511	501	617	912	547	735	960	286	398	692	661	-583
233	555	520	667	957	661	748	973	312	436	762	678	-625
271	584	559	690	966	674	767	999	318	471	777	695	-648
265	619	594	750	1004	693	808	1008	334	493	816	717	-675
326	657	645	766	1036	706	827	1043	391	543	836	754	-711
326	661	651	766	1036	702	827	1043	369	546	835	747	-709
329	657	655	766	1036	699	831	1043	363	547	834	745	-709

26%SC

Cast			9/21/10									
2:45	Zero	0.47										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
9/21/10	14:00	0.00	0	-0.611	-0.535	-0.661	0.242	0.307	0.303	-0.533	-0.399	-0.478
9/21/10	14:30	0.02	0.5	-0.622	-0.541	-0.654	0.252	0.296	0.316	-0.531	-0.388	-0.497
9/21/10	15:00	0.04	1	-0.611	-0.534	-0.654	0.246	0.305	0.307	-0.531	-0.379	-0.480
9/21/10	17:00	0.13	3	-0.624	-0.537	-0.649	0.243	0.313	0.310	-0.525	-0.383	-0.481
9/22/10	14:00	1.00	1	-0.690	-0.595	-0.730	0.172	0.232	0.252	-0.605	-0.458	-0.547
9/23/10	15:30	2.06	2	-0.736	-0.647	-0.760	0.146	0.196	0.200	-0.645	-0.500	-0.593
9/24/10	19:45	3.24	5	-0.746	-0.668	-0.793	0.095	0.163	0.158	-0.673	-0.522	-0.618
9/25/10	14:00	4.00	7	-0.779	-0.692	-0.817	0.069	0.121	0.117	-0.702	-0.534	-0.658
9/28/10	16:00	7.08	12	-0.872	-0.785	-0.895	-0.017	0.021	0.028	-0.800	-0.577	-0.756
10/5/10	13:40	13.99	14	-0.944	-0.872	-0.990	-0.125	-0.065	-0.075	-0.851	-0.627	-0.819
10/7/10	12:40	15.94	16	-0.947	-0.875	-0.988	-0.145	-0.094	-0.093	-0.856	-0.736	-0.819
10/9/10	11:30	17.90	19	-0.965	-0.881	-0.994	-0.161	-0.106	-0.103	-0.872	-0.743	-0.827
10/13/10	10:45	21.86	26	-0.964	-0.895	-1.014	-0.185	-0.123	-0.125	-0.883	-0.750	-0.842
10/15/10	10:15	23.84	28	-0.970	-0.906	-1.018	-0.186	-0.134	-0.131	-0.892	-0.750	-0.851
10/19/10	12:00	27.92	30	-0.994	-0.923	-1.032	-0.193	-0.137	-0.135	-0.904	-0.775	-0.863
10/26/10	10:30	34.85	34	-0.987	-0.927	-1.032	-0.186	-0.139	-0.132	-0.916	-0.793	-0.876
10/29/10	11:00	37.88	36	-0.992	-0.920	-1.035	-0.188	-0.144	-0.140	-0.920	-0.801	-0.884
11/2/10	10:30	41.85	40	-0.993	-0.926	-1.031	-0.206	-0.141	-0.150	-0.946	-0.824	-0.904
11/6/10	11:30	45.90	47	-0.989	-0.931	-1.041	-0.223	-0.162	-0.169	-0.948	-0.831	-0.916
11/10/10	14:00	50.00	50	-0.992	-0.929	-1.037	-0.226	-0.163	-0.171	-0.950	-0.820	-0.916
11/12/10	11:00	51.88	54	-0.992	-0.940	-1.038	-0.232	-0.161	-0.174	-0.954	-0.823	-0.914

26%SC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
307.319	307.395	307.269	308.122	308.187	308.183	307.247	307.381	307.302
307.308	307.389	307.276	308.132	308.176	308.196	307.249	307.392	307.283
307.319	307.396	307.276	308.126	308.185	308.187	307.249	307.401	307.300
307.306	307.393	307.281	308.123	308.193	308.190	307.255	307.397	307.299
307.240	307.335	307.200	308.052	308.112	308.132	307.175	307.322	307.233
307.194	307.283	307.170	308.026	308.076	308.080	307.135	307.280	307.187
307.184	307.262	307.137	307.975	308.043	308.038	307.107	307.258	307.162
307.151	307.238	307.113	307.949	308.001	307.997	307.078	307.246	307.122
307.058	307.145	307.035	307.863	307.901	307.908	306.980	307.203	307.024
306.986	307.058	306.940	307.755	307.815	307.805	306.929	307.153	306.961
306.983	307.055	306.942	307.735	307.786	307.787	306.924	307.044	306.961
306.965	307.049	306.936	307.719	307.774	307.777	306.908	307.037	306.953
306.966	307.035	306.916	307.695	307.757	307.755	306.897	307.030	306.938
306.960	307.024	306.912	307.694	307.746	307.749	306.888	307.030	306.929
306.936	307.007	306.898	307.687	307.743	307.745	306.876	307.005	306.917
306.943	307.003	306.898	307.694	307.741	307.748	306.864	306.987	306.904
306.938	307.010	306.895	307.692	307.736	307.740	306.860	306.979	306.896
306.937	307.004	306.899	307.674	307.739	307.730	306.834	306.956	306.876
306.941	306.999	306.889	307.657	307.718	307.711	306.832	306.949	306.864
306.938	307.001	306.893	307.654	307.717	307.709	306.830	306.960	306.864
306.938	306.990	306.892	307.648	307.719	307.706	306.826	306.957	306.866

26%SC

Retracción Real (µε)												
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1	2	3	Prom
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	20	-23	-32	36	-42	-7	-36	62	11	-13	7	-1
0	-3	-23	-13	6	-13	-7	-65	7	-9	-6	-22	12
42	7	-39	-3	-19	-23	-26	-52	10	3	-15	-23	12
257	195	225	227	243	165	234	192	225	226	212	217	-218
407	364	322	312	360	334	365	329	374	364	335	356	-352
439	433	430	477	467	470	456	400	456	434	472	437	-448
547	511	508	561	604	604	550	439	586	522	590	525	-545
849	813	762	841	928	892	869	579	905	808	887	784	-826
1084	1096	1071	1191	1207	1227	1035	742	1110	1084	1208	962	-1085
1093	1106	1064	1256	1301	1285	1051	1096	1110	1088	1281	1086	-1151
1152	1126	1084	1308	1340	1317	1103	1119	1136	1120	1322	1119	-1187
1149	1171	1149	1386	1395	1389	1139	1142	1185	1156	1390	1155	-1234
1168	1207	1162	1389	1431	1408	1168	1142	1214	1179	1409	1175	-1254
1246	1262	1207	1412	1441	1421	1207	1223	1253	1239	1425	1228	-1297
1223	1275	1207	1389	1447	1411	1247	1282	1295	1235	1416	1274	-1309
1240	1252	1217	1396	1463	1437	1260	1308	1321	1236	1432	1296	-1322
1243	1272	1204	1454	1454	1470	1344	1383	1386	1240	1459	1371	-1357
1230	1288	1237	1509	1522	1532	1351	1405	1425	1252	1521	1394	-1389
1240	1282	1224	1519	1525	1538	1357	1370	1425	1248	1527	1384	-1387
1240	1318	1227	1538	1519	1548	1370	1379	1419	1261	1535	1389	-1395

26%CC

Cast			9/21/10									
2:45	Zero	0.47										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
9/21/10	14:00	0.00	0	-0.815	-0.885	-1.015	-0.015	-0.069	-0.132			
9/21/10	14:30	0.02	0.5	-0.851	-0.921	-1.011	0.007	-0.037	-0.082			
9/21/10	15:00	0.04	1	-0.841	-0.903	-0.996	0.031	-0.026	-0.060			
9/21/10	17:00	0.13	3	-0.807	-0.852	-0.967	0.072	0.013	-0.021			
9/22/10	14:00	1.00	1	-0.826	-0.865	-0.983	0.049	0.002	-0.024			
9/23/10	15:30	2.06	2	-0.839	-0.875	-0.992	0.028	-0.001	-0.033			
9/24/10	19:45	3.24	5	-0.851	-0.897	-0.998	0.027	-0.018	-0.039			
9/25/10	14:00	4.00	7	-0.879	-0.926	-1.021	-0.001	-0.045	-0.065			
9/28/10	16:00	7.08	12	-0.968	-1.024	-1.103	-0.079	-0.133	-0.152			
10/5/10	13:40	13.99	14	-1.065	-1.126	-1.210	-0.194	-0.250	-0.263			
10/7/10	12:40	15.94	16	-1.084	-1.139	-1.245	-0.220	-0.268	-0.288			
10/9/10	11:30	17.90	19	-1.099	-1.156	-1.252	-0.231	-0.285	-0.296			
10/13/10	10:45	21.86	26	-1.139	-1.187	-1.290	-0.252	-0.302	-0.311			
10/15/10	10:15	23.84	28	-1.145	-1.196	-1.296	-0.260	-0.305	-0.319			
10/19/10	12:00	27.92	30	-1.156	-1.208	-1.303	-0.284	-0.323	-0.337			
10/26/10	10:30	34.85	34	-1.163	-1.210	-1.304	-0.293	-0.333	-0.343			
10/29/10	11:00	37.88	36	-1.158	-1.218	-1.310	-0.288	-0.333	-0.349			
11/2/10	10:30	41.85	40	-1.162	-1.224	-1.315	-0.287	-0.341	-0.353			
11/6/10	11:30	45.90	47	-1.178	-1.261	-1.331	-0.295	-0.357	-0.361			
11/10/10	14:00	50.00	50	-1.180	-1.257	-1.330	-0.306	-0.362	-0.364			
11/12/10	11:00	51.88	54	-1.183	-1.252	-1.331	-0.305	-0.359	-0.371			

26%CC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
307.575	307.505	307.375	307.865	307.811	307.748			
307.539	307.469	307.379	307.887	307.843	307.798			
307.549	307.487	307.394	307.911	307.854	307.820			
307.583	307.538	307.423	307.952	307.893	307.859			
307.564	307.525	307.407	307.929	307.882	307.856			
307.551	307.515	307.398	307.908	307.879	307.847			
307.539	307.493	307.392	307.907	307.862	307.841			
307.511	307.464	307.369	307.879	307.835	307.815			
307.422	307.366	307.287	307.801	307.747	307.728			
307.325	307.264	307.180	307.686	307.630	307.617			
307.306	307.251	307.145	307.660	307.612	307.592			
307.291	307.234	307.138	307.649	307.595	307.584			
307.251	307.203	307.100	307.628	307.578	307.569			
307.245	307.194	307.094	307.620	307.575	307.561			
307.234	307.182	307.087	307.596	307.557	307.543			
307.227	307.180	307.086	307.587	307.547	307.537			
307.232	307.172	307.080	307.592	307.547	307.531			
307.228	307.166	307.075	307.593	307.539	307.527			
307.212	307.129	307.059	307.585	307.523	307.519			
307.210	307.133	307.060	307.574	307.518	307.516			
307.207	307.138	307.059	307.575	307.521	307.509			

26%CC

Retracción Real (µε)												
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1	2	3	Prom
0	0	0	0	0	0				0	0	PROBETA ERRÓNEA LARGO MAYOR AL QUE SE PUEDE MEDIR	0
117	117	-13	-71	-104	-162				-90	-113		101
85	59	-62	-149	-140	-234				-139	-174		157
-26	-107	-156	-283	-266	-361				-243	-303		273
36	-65	-104	-208	-231	-351				-211	-263		237
78	-33	-75	-140	-221	-322				-182	-227		205
117	39	-55	-136	-166	-302				-161	-201		181
208	133	20	-45	-78	-218				-80	-114		97
497	452	286	208	208	65				112	160		-136
813	784	634	581	588	426				372	532		-452
875	826	748	666	647	507				424	606		-515
923	881	771	702	702	533				452	645		-549
1053	982	895	770	757	582				492	703		-597
1073	1011	914	796	767	608				506	723		-615
1109	1050	937	874	825	666				552	788		-670
1131	1057	940	903	858	686				571	815		-693
1115	1083	960	887	858	705				572	817		-694
1128	1102	976	884	884	718				580	828		-704
1180	1223	1028	909	936	744				604	863		-734
1187	1210	1025	945	952	754				619	884		-751
1196	1193	1028	942	942	777				621	887		-754

39%SC

Cast			9/22/10									
2:45	Zero	0.41										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
9/22/10	12:30	0.00	0	4.101	3.889	3.938	1.020	1.006	1.016	1.595	1.565	1.706
9/22/10	13:30	0.04	1	4.105	3.903	3.937	1.025	1.022	1.029	1.611	1.573	1.726
9/22/10	14:00	0.06	1.5	4.149	3.921	3.931	1.036	1.050	1.046	1.608	1.570	1.729
9/22/10	15:30	0.13	3	4.149	3.933	3.941	1.049	1.055	1.069	1.623	1.582	1.734
9/23/10	15:40	1.13	1	4.050	3.885	3.913	1.006	1.012	1.028	1.589	1.548	1.701
9/24/10	19:50	2.31	2	4.026	3.842	3.895	0.990	0.996	1.008	1.569	1.541	1.679
9/25/10	14:10	3.07	3	4.041	3.824	3.860	0.964	0.972	0.982	1.548	1.514	1.653
9/28/10	16:15	6.16	6	3.893	3.758	3.772	0.872	0.875	0.887	1.460	1.429	1.567
9/29/10	9:30	6.88	7	3.939	3.687	3.759	0.870	0.874	0.881	1.453	1.419	1.568
10/5/10	13:50	13.06	13	3.764	3.571	3.615	0.744	0.746	0.754	1.335	1.322	1.451
10/7/10	12:50	15.01	15	3.750	3.544	3.601	0.726	0.726	0.740	1.321	1.295	1.430
10/9/10	11:35	16.96	17	3.733	3.537	3.584	0.709	0.710	0.722	1.305	1.288	1.422
10/13/10	11:00	20.94	21	3.733	3.500	3.568	0.681	0.682	0.693	1.278	1.260	1.393
10/15/10	10:30	22.92	23	3.707	3.492	3.554	0.673	0.670	0.680	1.280	1.252	1.383
10/19/10	12:10	26.99	27	3.673	3.483	3.535	0.653	0.651	0.661	1.252	1.236	1.367
10/26/10	10:45	33.93	34	3.673	3.480	3.528	0.637	0.638	0.650	1.242	1.223	1.352
10/29/10	11:15	36.95	37	3.675	3.481	3.522	0.633	0.633	0.645	1.237	1.218	1.346
11/2/10	10:35	40.92	41	3.675	3.484	3.524	0.628	0.624	0.635	1.228	1.212	1.337
11/6/10	11:45	44.97	45	3.656	3.485	3.521	0.618	0.612	0.624	1.227	1.205	1.326
11/10/10	13:40	49.05	49	3.656	3.485	3.521	0.623	0.624	0.635	1.218	1.205	1.324
11/12/10	11:15	50.95	51	3.653	3.488	3.522	0.621	0.623	0.635	1.216	1.205	1.322

39%SC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
311.891	311.679	311.728	308.730	308.716	308.726	309.415	309.385	309.526
311.895	311.693	311.727	308.735	308.732	308.739	309.431	309.393	309.546
311.939	311.711	311.721	308.746	308.760	308.756	309.428	309.390	309.549
311.939	311.723	311.731	308.759	308.765	308.779	309.443	309.402	309.554
311.840	311.675	311.703	308.716	308.722	308.738	309.409	309.368	309.521
311.816	311.632	311.685	308.700	308.706	308.718	309.389	309.361	309.499
311.831	311.614	311.650	308.674	308.682	308.692	309.368	309.334	309.473
311.683	311.548	311.562	308.582	308.585	308.597	309.280	309.249	309.387
311.729	311.477	311.549	308.580	308.584	308.591	309.273	309.239	309.388
311.554	311.361	311.405	308.454	308.456	308.464	309.155	309.142	309.271
311.540	311.334	311.391	308.436	308.436	308.450	309.141	309.115	309.250
311.523	311.327	311.374	308.419	308.420	308.432	309.125	309.108	309.242
311.523	311.290	311.358	308.391	308.392	308.403	309.098	309.080	309.213
311.497	311.282	311.344	308.383	308.380	308.390	309.100	309.072	309.203
311.463	311.273	311.325	308.363	308.361	308.371	309.072	309.056	309.187
311.463	311.270	311.318	308.347	308.348	308.360	309.062	309.043	309.172
311.465	311.271	311.312	308.343	308.343	308.355	309.057	309.038	309.166
311.465	311.274	311.314	308.338	308.334	308.345	309.048	309.032	309.157
311.446	311.275	311.311	308.328	308.322	308.334	309.047	309.025	309.146
311.446	311.275	311.311	308.333	308.334	308.345	309.038	309.025	309.144
311.443	311.278	311.312	308.331	308.333	308.345	309.036	309.025	309.142

39%SC

Retracción Real (µε)												
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1	2	3	Prom
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-13	-45	3	-16	-52	-42	-52	-26	-65	-18	-37	-47	34
-154	-103	22	-52	-143	-97	-42	-16	-74	-78	-97	-44	73
-154	-141	-10	-94	-159	-172	-90	-55	-90	-102	-141	-79	107
164	13	80	45	-19	-39	19	55	16	86	-4	30	-37
240	151	138	97	32	26	84	78	87	176	52	83	-104
192	209	250	181	110	110	152	165	171	217	134	163	-171
667	420	533	479	424	418	436	440	449	540	441	442	-474
519	648	574	486	428	437	459	472	446	581	450	459	-497
1081	1020	1036	894	842	849	840	785	824	1046	862	817	-908
1125	1107	1081	952	907	894	886	873	892	1104	918	883	-969
1180	1129	1136	1007	959	952	937	895	918	1148	973	917	-1013
1180	1248	1187	1098	1050	1046	1025	986	1011	1205	1065	1007	-1092
1263	1274	1232	1124	1088	1088	1018	1012	1044	1256	1100	1024	-1127
1372	1303	1293	1189	1150	1150	1109	1063	1095	1323	1163	1089	-1191
1372	1312	1315	1241	1192	1186	1141	1105	1144	1333	1206	1130	-1223
1366	1309	1334	1254	1208	1202	1157	1122	1163	1336	1221	1147	-1235
1366	1299	1328	1270	1237	1234	1186	1141	1192	1331	1247	1173	-1250
1427	1296	1338	1302	1276	1270	1189	1164	1228	1354	1283	1194	-1277
1427	1296	1338	1286	1237	1234	1218	1164	1234	1354	1252	1205	-1270
1436	1287	1334	1292	1241	1234	1225	1164	1241	1352	1256	1210	-1273

39%CC

Cast			9/22/10									
2:45	Zero	0.41										
Fecha	Hora	DÍAS	TIEMPO	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
9/22/10	12:30	0.00	0	-0.523	-0.615	-0.494	3.562	3.580	3.665	-3.163	-3.151	-3.125
9/22/10	13:30	0.04	1	-0.422	-0.523	-0.452	3.675	3.727	3.745	-3.143	-3.131	-3.103
9/22/10	14:00	0.06	1.5	-0.405	-0.513	-0.420	3.710	3.687	3.783	-3.133	-3.124	-3.101
9/22/10	15:30	0.13	3	-0.395	-0.499	-0.359	3.726	3.717	3.794	-3.126	-3.115	-3.096
9/23/10	15:40	1.13	1	-0.444	-0.551	-0.419	3.703	3.681	3.754	-3.180	-3.167	-3.155
9/24/10	19:50	2.31	2	-0.474	-0.579	-0.450	3.659	3.643	3.730	-3.220	-3.202	-3.194
9/25/10	14:10	3.07	3	-0.495	-0.602	-0.487	3.657	3.629	3.719	-3.247	-3.232	-3.218
9/28/10	16:15	6.16	6	-0.588	-0.684	-0.578	3.572	3.554	3.635	-3.346	-3.334	-3.320
9/29/10	9:30	6.88	7	-0.587	-0.690	-0.571	3.571	3.540	3.634	-3.349	-3.336	-3.324
10/5/10	13:50	13.06	13	-0.692	-0.798	-0.671	3.480	3.442	3.546	-3.445	-3.435	-3.423
10/7/10	12:50	15.01	15	-0.709	-0.815	-0.693	3.452	3.434	3.520	-3.465	-3.453	-3.441
10/9/10	11:35	16.96	17	-0.723	-0.819	-0.698	3.451	3.431	3.530	-3.474	-3.463	-3.448
10/13/10	11:00	20.94	21	-0.734	-0.841	-0.713	3.431	3.417	3.511	-3.494	-3.478	-3.467
10/15/10	10:30	22.92	23	-0.736	-0.841	-0.716	3.429	3.409	3.506	-3.501	-3.484	-3.473
10/19/10	12:10	26.99	27	-0.758	-0.859	-0.734	3.409	3.393	3.490	-3.516	-3.504	-3.491
10/26/10	10:45	33.93	34	-0.771	-0.869	-0.745	3.409	3.391	3.494	-3.520	-3.506	-3.494
10/29/10	11:15	36.95	37	-0.774	-0.871	-0.744	3.409	3.389	3.491	-3.523	-3.510	-3.497
11/2/10	10:35	40.92	41	-0.788	-0.887	-0.764	3.396	3.383	3.482	-3.526	-3.516	-3.502
11/6/10	11:45	44.97	45	-0.785	-0.886	-0.761	3.394	3.380	3.479	-3.537	-3.517	-3.515
11/10/10	13:40	49.05	49	-0.783	-0.880	-0.755	3.390	3.378	3.471	-3.527	-3.511	-3.505
11/12/10	11:15	50.95	51	-0.784	-0.883	-0.757	3.390	3.379	3.472	-3.524	-3.514	-3.504

39%CC

Longitud Real								
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C
307.357	307.265	307.386	311.342	311.360	311.445	304.417	304.429	304.455
307.458	307.357	307.428	311.455	311.507	311.525	304.437	304.449	304.477
307.475	307.367	307.460	311.490	311.467	311.563	304.447	304.456	304.479
307.485	307.381	307.521	311.506	311.497	311.574	304.454	304.465	304.484
307.436	307.329	307.461	311.483	311.461	311.534	304.400	304.413	304.425
307.406	307.301	307.430	311.439	311.423	311.510	304.360	304.378	304.386
307.385	307.278	307.393	311.437	311.409	311.499	304.333	304.348	304.362
307.292	307.196	307.302	311.352	311.334	311.415	304.234	304.246	304.260
307.293	307.190	307.309	311.351	311.320	311.414	304.231	304.244	304.256
307.188	307.082	307.209	311.260	311.222	311.326	304.135	304.145	304.157
307.171	307.065	307.187	311.232	311.214	311.300	304.115	304.127	304.139
307.157	307.061	307.182	311.231	311.211	311.310	304.106	304.117	304.132
307.146	307.039	307.167	311.211	311.197	311.291	304.086	304.102	304.113
307.144	307.039	307.164	311.209	311.189	311.286	304.079	304.096	304.107
307.122	307.021	307.146	311.189	311.173	311.270	304.064	304.076	304.089
307.109	307.011	307.135	311.189	311.171	311.274	304.060	304.074	304.086
307.106	307.009	307.136	311.189	311.169	311.271	304.057	304.070	304.083
307.092	306.993	307.116	311.176	311.163	311.262	304.054	304.064	304.078
307.095	306.994	307.119	311.174	311.160	311.259	304.043	304.063	304.065
307.097	307.000	307.125	311.170	311.158	311.251	304.053	304.069	304.075
307.096	306.997	307.123	311.170	311.159	311.252	304.056	304.066	304.076

39%CC

Retracción Real (µε)												
1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	1	2	3	Prom
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-329	-299	-137	-363	-472	-257	-66	-66	-72	-255	-364	-68	229
-384	-332	-241	-475	-344	-379	-99	-89	-79	-319	-399	-89	269
-416	-378	-439	-527	-440	-414	-122	-118	-95	-411	-460	-112	328
-257	-208	-244	-453	-324	-286	56	53	99	-236	-354	69	174
-159	-117	-143	-312	-202	-209	187	168	227	-140	-241	194	62
-91	-42	-23	-305	-157	-173	276	266	305	-52	-212	282	-6
211	225	273	-32	84	96	601	601	640	236	49	614	-300
208	244	250	-29	128	100	611	608	654	234	66	624	-308
550	596	576	263	443	382	926	933	979	574	363	946	-628
605	651	647	353	469	466	992	992	1038	634	429	1007	-690
651	664	664	357	479	433	1022	1025	1061	659	423	1036	-706
686	736	712	421	524	494	1087	1074	1123	711	480	1095	-762
693	736	722	427	549	511	1110	1094	1143	717	496	1116	-776
765	794	781	491	601	562	1160	1160	1202	780	551	1174	-835
807	827	817	491	607	549	1173	1166	1212	817	549	1184	-850
817	833	813	491	613	559	1183	1179	1222	821	555	1195	-857
862	885	878	533	633	588	1192	1199	1238	875	584	1210	-890
852	882	869	540	642	597	1229	1202	1281	868	593	1237	-899
846	862	849	552	649	623	1196	1183	1248	852	608	1209	-890
849	872	856	552	646	620	1186	1192	1245	859	606	1208	-891

Anexo F: Extending internal curing to concrete mixtures with W/CM higher than 0.42

ABSTRACT

Internal curing (IC) is an effective method for improving performance of low W/CM - low permeability concretes because they require additional water to hydrate the cementitious materials. Conventional concretes, on the other hand, contain enough water to hydrate the cementitious materials, but are frequently not properly cured, allowing drying and compromising strength gain and durability. The aim of this investigation is to assess the effect of IC as a complement to traditional curing in relatively high W/CM concretes (W/CM above 0.42) under drying conditions. Degree of hydration, compressive strength, and permeability were measured in concretes with IC and without IC. Results show that even under drying conditions, mixtures with IC exhibit 16% higher hydration, 19% higher compressive strength, and 30% lower permeability than their counterparts with no IC. This suggests that IC can be very useful for improving performance in concrete mixtures with relatively high W/CM under poor curing conditions.

Key words: curing, permeability, durability, hydration, lightweight aggregates, curing agent.

1. Introduction

To obtain the required durability, strength and high performance during the life cycle of the structure, curing concrete is crucial from the first hours after its setting. Therefore, an effective in situ curing is required to maximize degree of hydration of cementitious material and to minimize cracking problems due to drying shrinkage.

1.1 Cementitious materials hydration

Hydration starts when mixing water contacts the cementitious materials, causing chemical reactions that produce calcium silicate hydrates, which make concrete stronger, and other hydration products such as calcium hydroxide and monosulphate. The formation of the hydration products is associated with a reduction of the original volume, what is called chemical shrinkage. [1].

Some part of the mixing water becomes chemically bonded to the hydration products, some other adsorbed at the surface of the hydration products, and the rest remains in solution at the capillary pores formed during hydration. Cementitious materials get the water needed to promote hydration from the capillary pores, which generates surface tensions that result in volumetric reductions known as autogenous shrinkage when occurs in a closed isothermal system that is not subjected to external forces [1].

Completing cementitious materials hydration process requires two conditions: i) there must be enough space for the formation of hydration products, and ii) there must be enough water to keep internal relative humidity above 80% for chemical reactions to occur. In concretes with W/CM lower than 0.36 condition i) is not met while in concretes with W/CM between 0.36 and 0.42 condition ii) is not met requiring additional curing water to approach to complete hydration [2].

1.2 Curing of concrete

Curing of concrete plays an important role to minimize shrinkage and early cement paste desiccation; proper curing is vital to the quality of concrete. Concrete mixtures with W/CM higher than 0.42 contain more water than required for the complete cement hydration; however, any water loss by evaporation will limit the maximum achievable degree of hydration; curing aims precisely to prevent such loss. An important aspect, often overlooked, is that curing should not only prevent water evaporation and keep concrete mixtures to appropriate internal relative humidity and temperature, but also should minimize shrinkage.

1.3 Application of internal curing to traditional concrete

Internal curing is a curing method studied and applied to low W/CM concretes, because they have insufficient water to hydrate the entire cement they have and, due to their low permeability, they prevent access of external curing water [3]. This technique consists of adding curing water reserves within the concrete, which will be available to assist the hydration of cementitious materials when the initial water has been used and/or lost to the environment.

Nevertheless, water loss and poor curing conditions can be also present in concrete mixtures with W/CM of 0.42 and above. Additionally, current practice shows a tendency to use finer cement or cements containing higher amounts of C_3S , leading an increase in hydration's rate and water use; and also a decrease in permeability at early ages. Both could make traditional curing insufficient to properly assist hydration, making internal curing an attractive alternative not only for low W/CM mixtures but also for traditional mixtures.

1.4 Results of an effective curing on concrete properties

The increase in cement hydration, promoted by an effective curing, has been shown to increase mechanical properties such as strength and elastic modulus [4]. However, an effective curing can also reduce shrinkage, and specifically cracking caused by shrinkage, which can also increase strength and elastic modulus [3]. Another mechanical property that has shown improvements with effective curing is creep; studies on concretes with W/CM of 0.23 with internal curing with expanded slate as curing agent showed less creep compared with normal aggregate concrete on long term [5].

Durability of concrete depends on several factors and properties, including permeability, degree of hydration, shrinkage, strength of the cement paste, presence of microcracks, among others. All of them can be improved through an effective curing, whether internal or external. Studies have shown that an effective internal curing decreases permeability of concrete, making more difficult that harmful agents penetrate concrete, increasing its durability. A study on chloride ion permeability in concrete of a low W/CM [6] showed that permeability of those mixtures with pre-wetted lightweight aggregate (internal curing agent) had a 39% and 29% of the permeability of the same mixture without internal curing at age 1 and 3 years, respectively.

A more effective curing tends to produce less shrinkage and cracking [1] [7]. Studies in concrete with W/CM of 0.23, with internal curing using expanded slate as curing agent, showed less shrinkage compared to normal aggregate concrete with long-term [5].

2. Research Significance

Nowadays, projects need to be open for service in shorter times each time; this undermines the implementation of a careful and effective traditional curing methods. There are many articles showing the benefits of using internal curing in concretes of low permeability and low W/CM, but it is not the same in concretes with W/CM higher than 0.42, which remain not studied yet.

The motivation of this research is the applicability of internal curing to complement traditional external curing, in concrete with W/CM higher than 0.4 to assess improvement in its properties when subjected to insufficient traditional curing. It is expected that internal curing could maintain high internal relative humidity by delivering water to cementitious materials promoting hydration.

3. Experimental Procedure

A total of ten concrete mixtures were fabricated during the experimental program. Five different W/CM were considered (from 0.400, 0.425, 0.450, 0.475, and 0.500); For each W/CM, concrete mixtures were prepared with internal curing or without internal curing.

Cement paste and aggregate volume remained constant for all concrete mixtures.

Six cylinders (100x200mm) were cast for each concrete mixture. All specimens were demolded 24 hours after casting, and then placed in a chamber at 23 °C and 50% of relative humidity until age of testing in order to produce drying conditions instead of curing conditions. All test were performed at the age of 90 days

3.1 Internal curing agent used

Although there are several potential curing agents to implement internal curing, this investigation used expanded clay sand (an artificial lightweight aggregate) given that this has been applied successfully in the past with low W/CM mixtures.

This curing agent was been chosen because of its absorption (water uptake), desorption (water release) and its particle size which allows better and more uniform distribution of the curing agent within the mixture; and thus, optimize the efficiency of internal curing minimizing the water transport distance which is limited [8].

The properties of the expanded clay lightweight aggregate are shown in Table 1.

Table 1: Properties internal curing agent used

Aggregate	Expanded clay sand
Size range (mm)	0.08 – 5
Absorption at 1 day	21,2%
Absorption at 3 days	28.5%
Absorption at 21 days	30.6%
Absorption at 32 days	30.8%
Dry specific gravity (kg/m³)	1.653
SSD specific gravity (kg/m³)	1.920
Porosity¹	41%
Desorption² (%/days x 10⁵)	10.1

1: porosity was measured through the Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) test

2: Desorption was measured by monitoring the amount of water loss by the lightweight aggregate - initially immersed for 3 days - when kept at 97% relative humidity. The reported value is the slope of water release versus time in %/days x 10⁵

3.2 Mixtures designs

The mixture designs of the concretes used in the study and their fresh properties are shown in Table 2.

Table 2: Mixtures designs in SSD condition (quantities in kg/m³ of concrete)

Constituents	IC ¹	NIC ²	IC	NIC	IC	NIC	IC	NIC	IC	NIC
W/CM	0.400		0.425		0.450		0.475		0.500	
Water	161		166		170		173		177	
Cement ³	403		389		377		364		354	
Coarse aggregate ⁴	841		841		841		841		841	
Fine aggregate ⁵	563	1028	563	1028	563	1028	563	1028	563	1028
Expanded clay	331	-	331	-	331	-	331	-	331	-
Fresh unit weight (kg/m ³)	2263	2464	2237	2434	2278	2449	2287	2463	2288	2432
Slump (cm)	1.0	1.5	1.0	2.0	1.5	1.0	2.5	2.5	2.5	4.0

1: IC: Internal curing applied; 2: NIC: No internal curing applied; 3: Ordinary Portland cement; 4: siliceous aggregate 10-mm maximum size aggregate; 5: siliceous aggregate 5-mm maximum size aggregate.

The investigation started with W/CM of 0.4 in order to produce data below the limit for fully hydration, which is 0.42; and ended with W/CM of 0.5 in order to assess the effect of internal curing at relatively high W/CM.

Mixtures were produced using 38% and 31% by volume of fine and coarse aggregate, respectively in all mixtures. Entrapped air was assumed to be 2% by volume. No water-reducing admixtures were considered in order to avoid possible effects in the properties of interest. Since mixtures contained different mixing water dosages, workability, measured by slump, varied between 1 and 4 cm; however, all mixtures could be well consolidated by an internal vibrator.

All concrete mixtures with internal curing had the same amount of internal curing water (81 kg/m³ of concrete). This fixed value corresponds to the amount of water lost by a concrete mixture with W/CM of 0.6 during one year at 50% relative humidity [9]. The internal curing water is contained within the expanded clay lightweight aggregate, which replaces a fixed amount of the normal fine aggregate. The expanded clay used was pre-wetted by immersing the lightweight aggregate in water for three days starting from a dry condition. Before mixing, lightweight aggregate was removed from water, let drain and then dried with paper towel to obtain a “surface dry” condition. This was possible because of the relatively low volumes used in the batches.

In industrial applications, moisture of the lightweight aggregate needs to be measure in order to adjust the water in the mix accordingly.

3.3 Testing

Degree of hydration (LOI, loss on ignition), compressive strength, and chloride ion permeability were measured on all concrete mixtures. The age of testing was 90 days in order to describe mixtures with an advanced time of hardening.

Four samples obtained from four different concrete specimens were tested for degree of hydration for each mixture. Samples were obtained by grinding down concrete using a mortar. Samples were obtained from the surface and center of the specimens in order to obtain a representative result. Approximately, 30 g of crushed concrete were placed in ceramic crucibles. First, the samples were placed at 105 °C for 24 hours, in order to remove the evaporable water (water not chemically bonded). Then, the samples were placed for a period of 3 hours at 1100 °C. It should be pointed out that at above 1000°C chemical bonds are broken and the water that has reacted with cement to form the hydration products (known as chemically bonded water) is removed. By knowing the mass loss of the sample between 105 and 1100°C and the loss on ignition of the unhydrated cement and aggregates (both normalweight and lightweight), the degree of hydration reached by the concrete mixtures was calculated. In these calculations the non-evaporable water content for fully hydrated cement is considered to be 0.23 g of water by 1 g of cement [10]. This value might vary with cement type, but for comparison purposes required in this investigation the assumed value is adequate.

Testing of compressive strength was performed at 90 days of age, according to ASTM C39. For each W/CM, four 100x200 mm cylindrical specimens were tested.

Chloride ion permeability was measured according to ASTM C1202 in two 100x50 mm disc-shaped specimens saw-cut at the age of 90 days. The test consists on placing the flat ends of the specimens on two cells containing different solutions, one cell contains 3% NaCl solution (which will be connected to the negative pole) and the other cell contains 0.3 N NaOH solution (which will be connected to the positive pole). The two poles are then connected a 60-volt power supply and the resulting current intensity through the specimen is measured every 5 minutes for 6 hours. The chloride ion permeability is expressed as the charged passed during the 6 hours through the specimen.

4. Test Results and Analysis

Table 3 presents the results of degree of hydration, compressive strength, and chloride ion permeability as W/CM varies from 0.4 to 0.5 in the mixtures with and without internal curing.

Table 3: Test results and coefficient of variation

W/CM	Curing condition	Degree of Hydration		Compressive strength		Chloride ion permeability	
		%	CV ¹	MPa	CV	Coulombs	CV
0.4	IC	62%	7.3%	74.0	5.6%	1671	5.9%
	NIC	47%	18.4%	67.5	8.7%	1768	23.8%
0.425	IC	70%	16.6%	61.8	6.6%	2846	2.1%
	NIC	48%	11.1%	50.8	7.9%	3290	1.8%
0.45	IC	66%	16.2%	66.8	1.0%	1587	0.6%
	NIC	51%	15.9%	49.1	7.3%	3237	9.3%
0.475	IC	69%	2.5%	55.4	7.5%	2649	5.5%
	NIC	59%	12.0%	47.5	11.0%	3131	0.8%
0.5	IC	67%	7.4%	61.9	3.2%	1625	9.5%
	NIC	50%	13.7%	55.0	3.2%	3342	7.3%
average	IC	67%	10.0%	64.0	4.8%	2076	4.7%
	NIC	51%	14.2%	54.0	7.6%	2954	8.6%

1: Coefficient of variation (standard deviation divided by average value)

4.1 Degree of hydration

Figure 1 presents the results of degree of hydration for the ten mixtures under investigation.

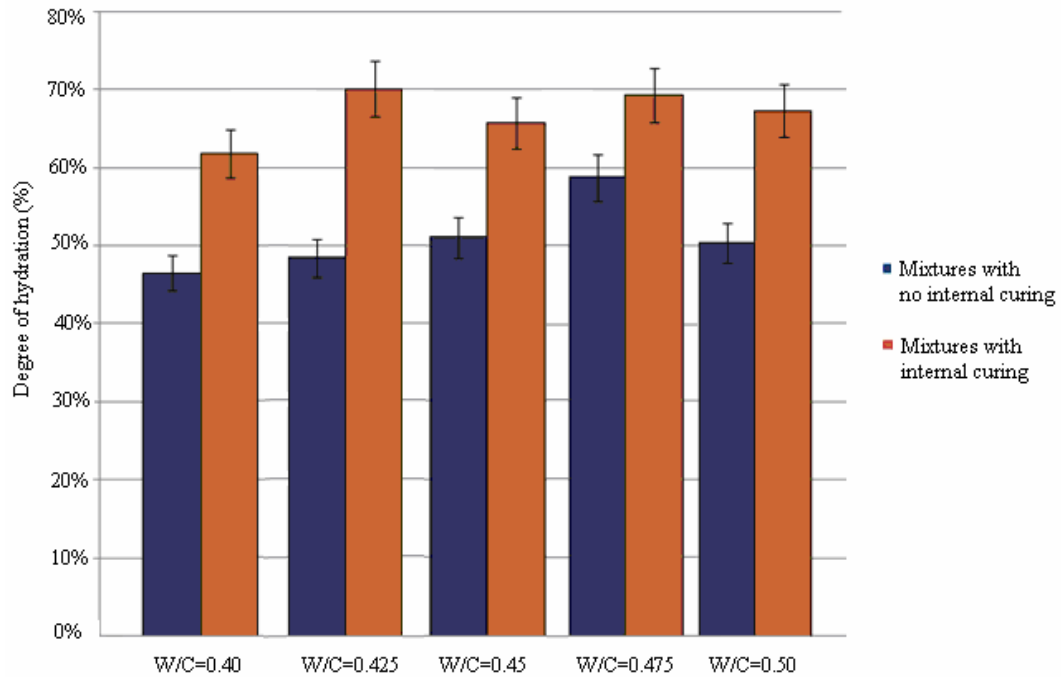


Figure 1: Degree of hydration of cement at 90 days

Theoretically, 100% hydration of cement can be reached in all mixtures with W/CM higher than 0.36. This is only if optimum and prolonged curing is considered [11].

As shown in Figure 1, none of the mixtures reached a value near to a degree of hydration of 100% in despite of some of them having W/CM 0.42 and above. This was expected since curing conditions were not optimum and the time of curing was only 90 days.

From Figure 1, it can be concluded that all mixtures with internal curing improved the degree of hydration compared with those mixtures without internal curing. The largest increase in the degree of hydration was obtained by the mixture with W/CM of 0.425 while the lowest one for the mixture with W/CM of 0.475; these values correspond to 22% and 10% respectively.

It is interesting to note that under poor curing conditions, such as those used in this investigation; the obtained degree of hydration does not increase as the W/CM

increases. This is valid for both cases: with internal curing and without it. This might be explained based on the fact that as W/CM increases, the pore structure of the cement paste becomes more interconnected, as shown by the chloride ion permeability results below. This increase in permeability suggests an increase in the water lost by drying with the subsequent reduction on the degree of hydration.

A previous study [12] measured a degree of hydration of 70.2% at 90 days of age in mixtures with Type I Portland cement at W/CM of 0.4 when cured at 20°C and 100% relative humidity with seal curing. The values in Table 3 show that mixtures with W/CM of 0.4 without internal curing reached a degree of hydration of only 47% when stored at 50% relative humidity and without sealing. This suggests that the poor curing conditions used in this investigation might have decrease degree of hydration from 70 to 47% (23% drop in degree of hydration) when no internal curing is applied. However, mixtures with internal curing reached a degree of hydration of 62% suggesting that internal curing can reduce the negative effects of the external drying (only 8% drop in degree of hydration)

This implies that internal curing allows for protecting/assisting hydration at 90 days even under drying conditions. Internal curing proves to be a powerful complement to traditional curing, especially when the later is not well applied.

Since some of the initial water content is lost to the environment during the 90-day drying of the specimens, the effective W/CM on each of the samples can be estimated in order to quantify the impact of drying on the mixtures with internal curing and those without internal curing.

In order to estimate the actual water used for hydration on each of the concrete mixtures, the initial porosity and the effective W/CM was calculated based on the model developed by Powers [13].

$$p = \frac{W / C}{W / C + \rho_w / \rho_c} \quad (1)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{p}{1.1(1 - p)} \quad (2)$$

Where:

p: initial porosity

W/CM: water/binder ratio

ρ_w : water density

ρ_c : cement density

$\alpha_{\max}$: maximum degree of hydration

By assuming that the maximum attainable degree of hydration has been reached after 90 days of age when stored at 50% of relative humidity, the model above can be used with the experimental degree of hydration shown in Table 3.

An “experimental initial porosity” can be estimated using the experimental degree of hydration and equation 2. Then, the effective W/CM can be calculated by using the experimental initial porosity and equation 1.

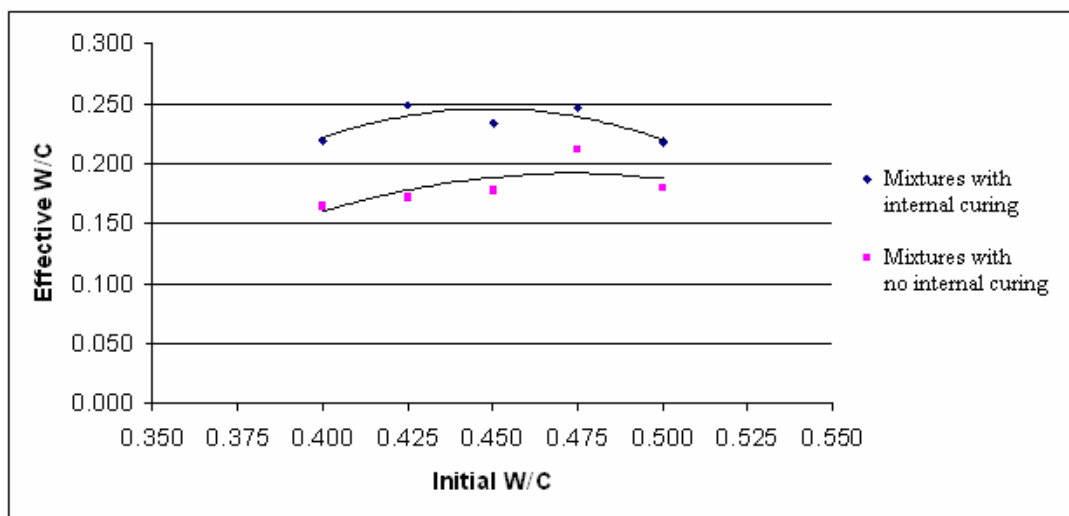


Figure 2: Effective W/CM based on the degree of hydration versus initial W/CM of the mixture

Figure 2 shows the initial W/CM versus the effective W/CM required to reach the degree of hydration obtained from LOI if there were no water exchanges with the environment (sealed curing). It can be noted that for every W/CM, mixtures with internal curing had a higher effective W/CM than its counterpart without internal curing. That is, mixtures with internal curing in drying conditions for 90 days performed similarly to sealed mixtures of W/CM between 0.22 and 0.25 while mixtures without internal curing in drying conditions for 90 days performed similarly to sealed mixtures of W/CM between 0.17 and 0.21.

Figure 3 shows the amount of water effectively lost by each mixture calculated as the difference between the initial amount of free water (see Table 2) and the effective water (calculated as the effective W/CM multiplied by the amount of cement).

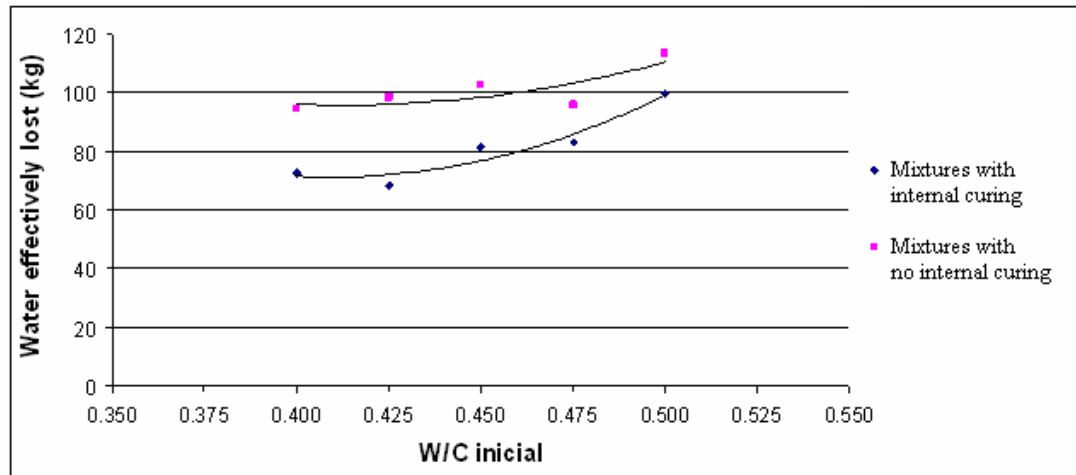


Figure 3: Water effectively lost versus initial W/CM

Figure 3 suggest that regardless of the initial W/CM, mixtures with internal curing showed less water effectively lost than those without internal curing; on average, mixtures with internal curing had 19.8 kg less of water effectively lost than their counterparts. This suggests that even though both types of mixtures were stored at 50% relative humidity, the cement paste of those with internal curing was less affected by drying than the cement paste of the mixtures without internal curing. This lower effect of drying in mixtures with internal curing is believed to be caused by the presence of the internally stored water within the lightweight aggregate. As cement paste lost water to the environment, “new” water migrated from the lightweight aggregate to the paste to assist hydration.

Figure 3 also suggests that the amount of water effectively lost increases as the initial W/CM increases. That is, mixtures with higher initial porosity (higher initial W/CM) show higher amount of water effectively lost suggesting that they are more severely affected by drying.

4.2 Compressive Strength

Figure 4 presents the average compressive strength at 90 days of age for the ten mixtures under investigation and its variability.

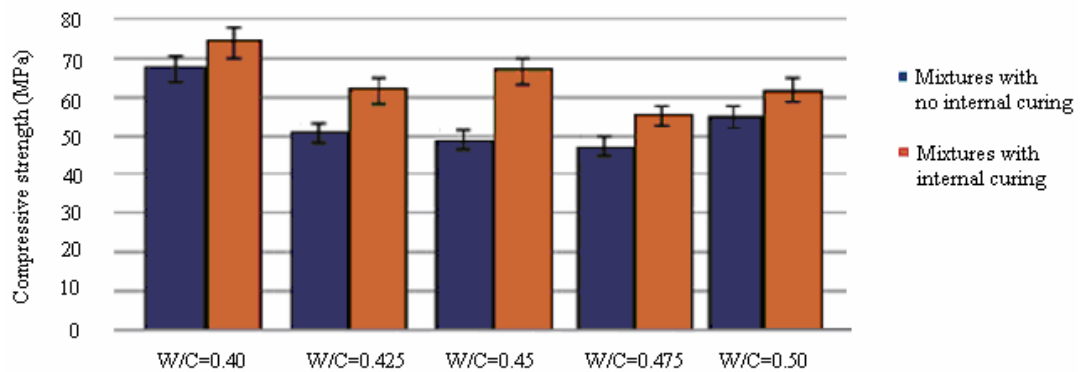


Figure 4: Compressive strength at 90 days

As shown in Figure 4, mixtures with internal curing exhibit higher compressive strength compared with those without internal curing, for the same W/CM.

The largest increase in compressive strength -18 MPa- was obtained for mixtures with W/CM of 0.45 while the lowest one -6 MPa- was obtained for mixtures with W/CM of 0.40. On average mixtures with internal curing showed a compressive strength 19% higher than those without it.

Since lightweight aggregate intrinsic strength is lower than that of normal weight aggregate, a decrease in concrete strength when using lightweight aggregate can be expected (this is known as ceiling strength [14]). Nevertheless, mixtures with internal curing (with lightweight aggregate) not only did not show a decrease in strength but also an increase. It can be concluded that the strength gained due to a higher degree of hydration is more important than the eventual decrease in strength caused by the use of a lower intrinsic strength lightweight aggregate as curing agent. It should be noted that all mixtures had the same amount of lightweight aggregate (amount of internal curing water remained constant for all W/CM), then reduction in compressive strength due to the use of lightweight aggregate should be similar in all of them.

It is interesting to note that compressive strength of mixtures without internal curing did not vary importantly for W/CM of 0.425 and above. This might be related to the drying conditions that produced important water losses and limited the attainable degree of hydration. This suggests that under poor curing conditions a reduction in W/CM does not necessarily provide higher strength. This was also true for mixtures with

internal curing meaning that this curing method should not replace external/traditional curing, but it should be a complement of it.

4.3 Chloride ion permeability

Figure 5 presents the average chloride ion permeability at 90 days of age for the ten mixtures under investigation and its variability.

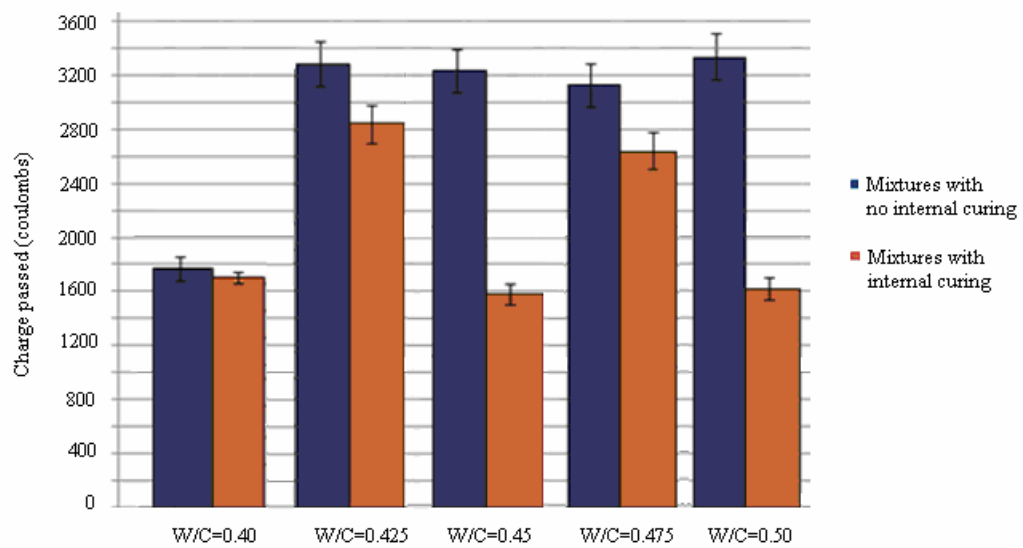


Figure 5: Chloride ion permeability 90 days

As shown in Figure 5, mixtures with internal curing exhibit lower permeability compared with those without internal curing, for the same W/C.

The largest decrease in chloride ion permeability -1717 coulombs- was obtained for mixtures with W/C of 0.50 while the smallest decrease in chloride ion permeability - 97 coulombs- was obtained for mixtures with W/C of 0.40. On average mixtures with internal curing showed chloride ion permeability 30% lower than those without it. These results were expected since the mixtures with internal curing showed a higher degree of hydration meaning that they have achieved a more compact and less permeable cement paste microstructure.

It should be considered that the decrease in chloride ion permeability was obtained in despite of the fact that lightweight aggregate was used as internal curing agent. The use of a more porous aggregate could have increased permeability. However, as concluded in previous studies [6] [15], in this case concrete permeability is controlled by cement paste permeability rather than the aggregate permeability.

4.4 Statistical comparison of concrete properties and discussion of results

It is well known that a higher degree of hydration in cementitious materials increases strength and decreases permeability, which are probably the two most commonly sought properties in a high performance concrete.

The results of tests conducted in the different mixtures with internal curing showed precisely an increase in strength and a decrease in permeability in comparison with those mixtures without it.

The experimental design allowed performing statistical comparisons to know whether internal curing brings significant benefits in increasing the degree of hydration. Experimental design was analyzed through t-student test to evaluate the performance of internal curing on: hydration, compressive strength and chloride ion permeability as shown in Table 4. The results of t-student test showed that internal curing:

- significantly increased cement degree of hydration with 99.9% of confidence level.
- significantly increased compressive strength with 98.8% of confidence level.
- significantly decreased chloride ion permeability of concrete with 99.0% of confidence level.

Table 4: Statistical comparison of concrete properties

DATA	IC ¹	NIC ²	IC	NIC	IC	NIC
Test	Compressive strength		Permeability		Degree of Hydration	
Average	63 MPa	54 MPa	2076 coulombs	2953 coulombs	67%	51%
Standard Deviation	3.426		301.38		0.025	
Degrees of freedom	28		18		36	
t-value	2.70		2.91		6.25	
Significance (α)	1.20%		1.00%		0.00010%	
$T_{(1-\alpha)}$	2.69		2.88		5.88	
Hypothesis (H_0)	$IC_{strength} = NIC_{strength}$		$IC_{permeability} = NIC_{permeability}$		$IC_{hydration} = NIC_{hydration}$	
Rejection interval	$t\text{-value} \geq t_{(1-\alpha)}$		$t\text{-value} \geq t_{(1-\alpha)}$		$t\text{-value} \geq t_{(1-\alpha)}$	

1: IC: Internal curing applied; 2: NIC: No internal curing applied

Mixtures with internal curing did not only present higher degree of hydration in comparison with those without it, but also presented lower variability as shown by the

lower coefficient of variation (see Table 3). Reduction in variability in mixtures with internal curing was also observed in compressive strength and chloride ion permeability. That is, coefficients of variation of mixtures with internal curing were 63 and 55% of that of mixtures without internal curing for compressive strength and chloride ion permeability, respectively.

5. Conclusions

The increased competitiveness in the construction industry requires the production of a higher performance concrete, with higher strength and durability. These characteristics do not depend only on the constituents and proportioning of the mixture but also on curing. However, current construction speed requirements are generally against the implementation of a proper concrete curing.

This research aims to apply internal curing, a technology widely investigated in the last decade with low W/CM concrete mixtures, as a complement to traditional curing on site for concrete mixtures with W/CM higher than 0.42.

Mixtures with and without internal curing were kept at 50% of relative humidity in order to represent poor curing conditions. From the results obtained herein, it can be concluded that the mixtures with internal curing showed less water effectively lost than the mixtures without it. That is, internal curing was able to maintain better curing conditions for the cement paste even under drying conditions.

Note that properties of concrete are strongly affected by a poor curing, e.g., the degree of hydration in mixtures without internal curing was generally below 55% and none of them were above 60%. This had a direct impact on compressive strength, chloride ion permeability, and other properties.

The use of internal curing allowed a 15% increase in degree of hydration under the drying conditions considered herein. This increase in hydration is believed to be the cause of the 19% increase in compressive strength observed in mixtures with internal curing with respect to those without it. Also a 30% decrease in chloride ion permeability was observed when using internal curing.

It is concluded that the application of internal curing brings benefits when it is applied on traditional concrete as a complement to traditional curing methods.

Internal curing reported benefits regardless of the W/CM considered. That is, mixtures with high W/CM under poor curing conditions, as those considered herein, tend to lose water and reach a limited degree of hydration. Thus, internal curing is helpful regardless the initial water content in the mixture.

This investigation considered the same amount of internal curing water regardless the W/CM of the mixture. Future investigations should increase internal curing water as W/CM increases, so the water loss is somehow counteracted.

6. Acknowledgments

The authors acknowledge the funding of research by CONICYT Chile through FONDECYT Regular Project No. 11060341.

Authors also acknowledge the help of Mario Olivares, Claudio Valdes and the staff of DICTUC during specimen preparation and testing; Javier Castro for his review and advice on the experimental data; Jorge Ramos and Patricio Perez, from the Department of Mechanical and Metallurgical Engineering at Pontificia Universidad Catolica; and Alvaro Paul, Marianela Noriega, Alex Leiva, Jorge Donoso, Patricio Pinilla, Patricio Garcia, Mauricio Guerra, and Eduardo Gonzalez for their help during the experimental work.

7. References

- [1]Jensen OM, Hansen F. Autogenous deformation and RH-Change in perspective”, Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 12, 2001, pp. 1859-1865.
- [2]Mindess S, Young JF, Darwing D. Concrete. 2nd ed.: Prentice Hall, 2002.
- [3]Lopez M, Kahn LF, Kurtis KE. Internal curing in high performance concretes - a new paradigm (in spanish). Revista Ingenieria de Construccion, V. 20. No. 2, 2005, pp. 117-126
- [4]Mehta PK, Monteiro PJM. Concrete: microstructure, properties and materials. 3rd ed.. McGraw-Hill, 2006.
- [5]Lopez M, Kahn L, Kurtis K. Effect of internally stored water on creep of high-performance concrete. ACI Materials Journal, V. 105, No. 3, 2008. pp. 265-273.
- [6]Thomas MDA. Chloride diffusion in high-performance lightweight aggregate concrete. ACI Special Publications, NUMB 234, 2006, pages 797-812.
- [7]Bentur A, Igarashi SI, Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. Cement and Concrete Research, Vol. 31, No.11, 2001, pp. 1587-1591.
- [8]Bentz, DP. Internal curing of high-performance blended cement mortars, ACI Materials Journal. Vol. 104, No 4, 2007, pp 408-414
- [9]Lopez M, Creep and shrinkage of HPLC - PhD thesis Mauricio Lopez, 2005
- [10]Bentz DP, Hansen K. Preliminary observations of water movement in cement pastes during curing using x-ray absorption. Cement and Concrete Research. Vol. 30, No. 7, 2000, pp 1157-1168.
- [11]Bentz DP, Lura P, Roberts J. Mixture proportioning for internal curing. Concrete International, Vol. 27, No. 2, 2005, pp. 35-40.
- [12]Feng X, Garboczi EJ, Bentz DP, Stutzman PE, Mason TO. Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscopy point-counting procedure. Cement and Concrete Research. Vol. 34, 2004, pp 1787-1793.
- [13]Jensen OM, Mechanisms of internal water curing. Internal Curing of Concrete, RILEM TC 199-ICC: State-of-the-Art-Report, Chapter 3, 2007.
- [14]ACI Committee 213. Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute, 2003.
- [15]Zhang MH, Gjorv OE. Characteristics of lightweight aggregate for high-strength concrete. ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 2, 1991, pp. 150–158.