



**Universidad  
de Valparaíso**  
CHILE

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**

# **“Evaluación de la influencia de distintos tipos de agregados y adición en la retracción del hormigón autocompactante”**

Por

**Diego Rojas Cepeda**

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

**PROF. GUÍA: Sara Ojeda**

**Noviembre, 2016**

**Dedicado a todas las personas que me apoyaron en este proceso, aquellas que celebraron y sufrieron por cada una de mis notas. A todos ellos muchas gracias por estar ahí conmigo.**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Durante el tiempo que duró todo el proceso fui acompañado y apoyado por un grupo de personas que finalmente son parte importante de mi vida.*

*Con lo anterior me refiero a la familia que siempre creyó y confió en mis conocimientos y capacidades, sin ellos esto hubiese sido muchísimo más complejo.*

*Agradezco además a mis compañeros (as) y amigos (as) los cuales me brindaron su apoyo en este proceso universitario, muchas gracias a todos.*

*Siempre es importante mencionar y agradecer eternamente a Emperatriz y Fabiola, quienes en todo momento nos atendieron y dieron solución a todos nuestros problemas.*

*En la parte final de esta etapa se realizó este trabajo el cual me hizo conocer a grandes personas que me enriquecieron con sus conocimientos y buenos momentos.*

*Agradecer al personal de laboratorio como es Don Victor o Vitoco como le decíamos con cariño, el cual nos contagiaba con la energía esos días que teníamos que elaborar hormigón por las mañanas. También mencionando y dando las gracias a Don Aldo que nos entregaba los conocimientos de laboratorio.*

*A mi profesora Guía Sara Ojeda por la paciencia y su tiempo dedicado a ayudar a sacar adelante mi tema, gracias por los consejos, su buena disposición y profesionalismo entregado.*

*Agradecer además al profesor Andrés Jamet por toda la ayuda prestada en el proceso inicial de este trabajo, por sus consejos y sabiduría.*

*A todos los mencionados anteriormente, muchas gracias, me llevo todos los conocimientos adquiridos de ustedes.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Antecedentes Generales.....</b>	<b>Pág. 10</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	Pág. 10
1.2 Objetivos	
1.2.1 General.....	Pág. 13
1.2.2 Particular.....	Pág. 13
1.3 Alcance.....	Pág. 14
1.4 Hipótesis.....	Pág. 15
1.5 Pregunta de investigación .....	Pág. 15
<b>Capítulo 2: Marco Teórico.....</b>	<b>Pág. 16</b>
2.1 Hormigón autocompactante.....	Pág. 16
2.2 Generalidades hormigón autocompactante.....	Pág. 18
2.3 Composición.....	Pág. 19
2.3.1 Cemento.....	Pág. 19
2.3.2 Árido.....	Pág. 20
2.3.3 Agua.....	Pág. 21
2.3.4 Aditivo.....	Pág. 21
2.3.5 Adiciones.....	Pág. 24
2.4 Comportamiento del hormigón.....	Pág. 26
2.4.1 Hormigón fresco.....	Pág. 26
2.4.2 Hormigón endurecido.....	Pág. 26
2.5 Retracción en el hormigón.....	Pág. 27
2.5.1 Retracción hidráulica.....	Pág. 27
2.5.1.1 Retracción plástica.....	Pág. 27
2.5.1.2 Retracción autógena.....	Pág. 27
2.5.1.3 Retracción por carbonatación.....	Pág. 28
2.5.1.4 Retracción térmica.....	Pág. 28
2.5.1.5 Retracción por secado o hidráulica.....	Pág. 28
2.5.2 Variables relevantes que influyen en la retracción.....	Pág. 29
2.5.2.1 Cemento.....	Pág. 29
2.5.2.2 Relación agua/cemento.....	Pág. 29
2.5.2.3 Agregados Pétreos.....	Pág. 30
a) Vidrio reciclado .....	Pág. 31
b) Escoria de cobre.....	Pág. 33
2.5.2.4 Adiciones y aditivo.....	Pág. 36
a) Fibras de polipropileno.....	Pág. 37
2.5.2.5 Condiciones ambientales.....	Pág. 38
2.5.2.6 Geometría del elemento.....	Pág. 39
2.5.3 Retracción en el hormigón autocompactante.....	Pág. 40
<b>Capítulo 3: Diseño experimental.....</b>	<b>Pág. 42</b>
3.1 Generalidades.....	Pág. 42
3.2 Definición de los parámetros.....	Pág. 43
3.2.1 Variables independientes.....	Pág. 43
3.2.2 Variables dependientes.....	Pág. 46
3.3 Factorial experimental.....	Pág. 47
3.4 Materias primas utilizadas .....	Pág. 48
3.5 Propiedades de los áridos.....	Pág. 49
3.5.1 Densidades de los áridos.....	Pág. 49
3.5.1.2 Áridos gruesos.....	Pág. 49

3.5.1.3 Áridos Finos.....	Pág. 51
3.5.2 Granulometría.....	Pág. 55
3.6 Aparatos y equipos.....	Pág. 61
3.7 Aparatos y equipos para la retracción libre.....	Pág. 62
3.8 Ensayos realizados.....	Pág. 63
3.8.1 Ensayo de caja en L.....	Pág. 63
3.8.2 Prueba del cono de abrams invertido.....	Pág. 65
3.9 Metodología de trabajo.....	Pág. 65
3.9.1 Dosificación del HAC.....	Pág. 65
3.9.2 Cuantificación de probetas utilizadas.....	Pág. 67
3.9.3 Medición retracción libre según norma NCh 2221.Of 94.....	Pág. 68
3.9.4 Medición de compresión.....	Pág. 70
3.10 Elaboración de hormigones y confección de probetas.....	Pág. 71
<b>Capítulo 4: Presentación y análisis de resultados.....</b>	<b>Pág. 73</b>
4.1 Propiedades del hormigón autocompactante en estado fresco.....	Pág. 73
4.2 Ensayo de retracción libre.....	Pág. 76
4.2.1 Retracción hidráulica.....	Pág. 77
4.2.2 Pérdida de peso en hormigones.....	Pág. 78
4.3 Resistencia a compresión.....	Pág. 81
<b>Capítulo 5: Conclusiones y proposición de futuras investigaciones.....</b>	<b>Pág. 85</b>
5.1 Conclusiones.....	Pág. 85
5.1 Futuras investigaciones.....	Pág. 86
<b>Capítulo 6:Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>Pág. 87</b>
<b>Capítulo 7:Anexos .....</b>	<b>Pág. 90</b>
Tabla 7.1 : Lectura de peso.....	Pág. 90
Tabla 7.2 : Lectura promedio de peso.....	Pág. 91
Tabla 7.3 : Lectura diferencia de peso.....	Pág. 91
Tabla 7.4 : Lectura de peso en porcentaje.....	Pág. 91
Tabla 7.5 : Lectura de peso en porcentaje acumulado.....	Pág. 92
Tabla 7.6 : Lectura de retracción.....	Pág. 92
Tabla 7.7 : Lectura diferencia de retracción.....	Pág. 94
Tabla 7.8 : Lectura diferencia promedio de retracción.....	Pág. 95
Tabla 7.9 : Lectura retracción acumulado.....	Pág. 95
Tabla 7.10: Lectura Resistencia a compresión.....	Pág. 96
Tabla 7.11:Árido Combinado Hormigón patrón.....	Pág. 97
Tabla 7.12: Árido Combinado Hormigón con 20% de escoria.....	Pág. 98
Tabla 7.13: Árido Combinado Hormigón con 60% de escoria.....	Pág. 99
Tabla 7.14: Árido Combinado Hormigón con 20% de vidrio.....	Pág. 100
Tabla 7.15: Árido Combinado Hormigón con 60% de vidrio.....	Pág. 101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa entre hormigón convencional y hormigón autocompactante.	Pág. 17
Tabla 2: Evolución de tipos de aditivos a lo largo del tiempo.....	Pág. 21
Tabla 3: Autores opinan sobre el tamaño de la partícula de un material como fino..	Pág. 24
Tabla 4: Clasificación de las adiciones en función a su hidraulicidad.....	Pág. 25
Tabla 5: Componentes de la escoria de cobre.....	Pág. 34
Tabla 6: Retracción hidráulica de 3 hormigones convencionales.....	Pág. 44
Tabla 7: Porcentaje en relación a la retracción alcanzada a los 90 y 448 días.....	Pág. 44
Tabla 8: Factorial experimental.....	Pág. 47
Tabla 9: Especificaciones técnicas del aditivo.....	Pág. 49
Tabla 10: Densidad aparente suelta, Grava 20 mm.....	Pág. 49
Tabla 11: Densidad aparente compactada, Grava 20 mm.....	Pág. 50
Tabla 12: Densidad real y absorción, Grava 20 mm.....	Pág. 50
Tabla 13: Densidad aparente suelta, Escoria de cobre 20 mm.....	Pág. 50
Tabla 14: Densidad aparente compactada, Escoria de cobre 20 mm.....	Pág. 51
Tabla 15: Densidad real y absorción, Escoria de cobre 20 mm .....	Pág. 51
Tabla 16: Densidad aparente suelta, Arena.....	Pág. 51
Tabla 17: Densidad aparente compactada, Arena.....	Pág. 52
Tabla 18: Densidad real y absorción, Arena.....	Pág. 52
Tabla 19: Densidad aparente suelta, Vidrio molido .....	Pág. 52
Tabla 20: Densidad aparente compactada, Vidrio molido.....	Pág. 53
Tabla 21: Densidad real y absorción, Vidrio Molido.....	Pág. 53
Tabla 22: Densidad aparente suelta, Filler .....	Pág. 53
Tabla 23: Densidad aparente compactada, Filler.....	Pág. 54
Tabla 24: Densidad real y absorción, Filler.....	Pág. 54
Tabla 25: Porcentaje que pasa acumulado de la arena.....	Pág. 55
Tabla 26: Porcentaje que pasa acumulado de la grava.....	Pág. 56
Tabla 27: Porcentaje que pasa acumulado de la escoria de cobre.....	Pág. 57
Tabla 28: Porcentaje que pasa acumulado del vidrio .....	Pág. 58
Tabla 29: Áridos combinados.....	Pág. 59
Tabla 30: Árido combinado con reemplazo de 60% de vidrio.....	Pág. 60
Tabla 31: Dosificación patrón.....	Pág. 65
Tabla 32: Dosificación en volumen.....	Pág. 66
Tabla 33: Dosificación en peso.....	Pág. 66
Tabla 34: Dosificación para 35 Litros.....	Pág. 67
Tabla 35: Cuantificación de probetas.....	Pág. 67
Tabla 36: Planificación ensayo retracción libre.....	Pág. 69
Tabla 37: Ensayos al hormigón autocompactante en estado fresco.....	Pág. 74
Tabla 38: Expansión y retracción hidráulica.....	Pág. 77
Tabla 39: Pérdida de peso en hormigones autocompactantes.....	Pág. 78
Tabla 40: Pérdida de peso en hormigones medidos en porcentaje.....	Pág. 80
Tabla 41: Resistencia a compresión.....	Pág. 82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre el contenido de agua en el hormigón fresco y retracción por secado.....	Pág. 30
Figura 2: Escoria de cobre en depósito de ventanas.....	Pág. 35
Figura 3: Deformación por retracción en hormigón autocompactante.....	Pág. 43
Figura 4: Deformación por retracción de hormigones convencionales.....	Pág. 45
Figura 5: Curva granulométrica de la arena.....	Pág. 55
Figura 6: Curva granulométrica de la grava.....	Pág. 56
Figura 7: Curva granulométrica de la escoria de cobre.....	Pág. 57
Figura 8: Curva granulométrica del vidrio molido.....	Pág. 58
Figura 9: Granulometría de áridos combinados.....	Pág. 59
Figura 10: Granulometría del árido combinado con reemplazo 60% de vidrio.....	Pág. 60
Figura 11: Betonera de eje vertical.....	Pág. 61
Figura 12: Piscina de curado.....	Pág. 61
Figura 13: Caja en L.....	Pág. 63
Figura 14: Escurrimiento de cono.....	Pág. 64
Figura 15: Ensayo retracción libre.....	Pág. 69
Figura 16: Molde de retracción libre.....	Pág. 69
Figura 17: Equipo de resistencia de compresión.....	Pág. 70
Figura 18: Ensayo de escurrimiento.....	Pág. 71
Figura 19: Moldes de ensayo.....	Pág. 72
Figura 20: Ensayo extensión de flujo.....	Pág. 74
Figura 21: Ensayo caja en L.....	Pág. 75
Figura 22: Cámara de secado.....	Pág. 76
Figura 23: Retracción Hidráulica.....	Pág. 78
Figura 24: Grafico pérdida de peso.....	Pág. 79
Figura 25: Grafico pérdida de peso medido en porcentaje.....	Pág. 80
Figura 26: Ensayo de Compresión.....	Pág. 81
Figura 27: Resistencia a compresión.....	Pág. 83
Figura 28: Patrones de rotura satisfactorios.....	Pág. 84

## Resumen

El hormigón autocompactante fue creado hace más de 20 años en Japón por el profesor Okamura de la universidad de Tokio, la forma en la que se llegó a crear este material pasa por una serie de necesidades que se producían en Japón en esos años como la poca mano de obra y las ganas de aumentar la producción. Este Hormigón cuenta con una gran cantidad de atributos que se pueden ver reflejados en obra y también los pueden presenciar los trabajadores del rubro, aunque en bajas cantidades su implementación puede ser más costosa, pero en grandes cantidades puede ser muy ventajoso.

El tema a tratar en la presente investigación es la retracción, fenómeno que se produce en todos los tipos de hormigones pero se estudiará específicamente como afecta a los autocompactantes.

Existen autores que han investigado sobre la retracción en autocompactantes llegando a distintas conclusiones como las siguientes:

- Persson (2005) determinó que, debido al menor contenido de árido grueso en el hormigón Autocompactante, la retracción era aproximadamente un 20% mayor que en el convencional.
- La presencia de áridos en el hormigón restringe las deformaciones, ya que los áridos normalmente utilizados no sufren fluencia cuando son sometidos a las tensiones usuales de servicio en el hormigón (Neville, 2002).
- See y Attiogbe (2005) concluyó que reducir la relación arena/total aridos no influye sobre la retracción pero reducir el volumen de pasta de 35 a 30% si contribuye a la disminución de la retracción.

Como se presenta en los párrafos anteriores y según la bibliografía consultada se apreció que son distintos los factores que influyen en este fenómeno. Además los autores concluyen que en el hormigón autocompactante se produce mayor retracción que en uno convencional.

Por lo que se trata de estudiar si sustituyendo alguno de los áridos con otras características se puede disminuir la retracción. Con esto nace la idea de reemplazar los áridos con materiales con características diferentes ya sea en densidad como en forma geométrica, generando un reemplazo en distintos porcentajes, con esto determinando cuanto influye cada árido en la retracción.

El hormigón autocompactante debe cumplir con ciertos requisitos para ser catalogado como tal, el requisito más importante es ser capaz de pasar entre las armaduras y adecuarse a cualquier encofrado autocompactándose por peso propio, para la elaboración de este hormigón se desarrollaron ensayos que demostraran este comportamiento en laboratorio. Los ensayos realizados fueron el ensayo de la caja en L y el ensayo de escurrimiento de cono o Abrams invertido.

Los resultados principales entregados por los ensayos y estudios realizados en este trabajo de investigación fueron favorables, tanto en lo relacionado a la autocompactabilidad del hormigón medido por los ensayos al hormigón fresco y lo que concierne a la retracción hidráulica.

## Abstract

The concrete autocompactante was created over 20 years ago in Japan by Professor Okamura at the University of Tokyo, the way in which it came to create this material passes through a series of needs that were produced in Japan in those years as the little labor and the desire to increase production. This concrete account with a lot of attributes that can be seen reflected in work and also the can witness the workers in the area, although in low amounts its implementation may be more costly, but in large amounts can be very advantageous.

The topic to be addressed in the present investigation is the retract, phenomenon that occurs in all types of concrete but will be considered as specifically affects the autocompactantes.

There are authors who have investigated the retraction in autocompactantes reaching different conclusions as the following:

- Persson (2005) determined that, due to the lower content of arid bulk in the concrete Autocompactante, retraction was approximately 20 per cent higher than in the conventional.
- The presence of aggregates in the concrete restricts the deformations, since the aggregates normally used do not suffer creep when are subject to the usual tension of service in the concrete (Neville, 2002).
- See and Attiogbe (2005) concluded that reduce the relationship sand/total barren has no influence on the retract but reduce the volume of pulp of 35 to 30% if it contributes to the reduction of the retract.

As presented in the preceding paragraphs and according to the bibliography consulted appreciated that are different factors that influence this phenomenon. In addition the authors conclude that in the concrete autocompactante occurs more conventional that in one retract.

It is studying if replacing any of the aggregates with other features you can decrease the retract. With this was born the idea of replacing the aggregates from materials with different characteristics either in density as in geometric shape, generating a replacement in different percentages, with this determining how important each arid in the retract.

The concrete autocompactante must meet certain requirements to be catalogd as such, the most important requirement is to be able to pass between the frames and conform to any formwork autocompactándose by own weight, for the elaboration of this concrete trials were conducted to demonstrate this behavior in the laboratory. The tests carried out were the test of the box in L and the testing of runoff of cone or Abrams invested.

The main results delivered by the tests and studies in this work of investigation were favorable, both in relation to the concrete autocompactabilidad measured by the trials at the fresh concrete and what affects the hydraulic retraction.

# **1. Antecedentes Generales.**

## **1.1 Planteamiento del problema**

El hormigón es uno de los materiales más extensamente empleado en la edificación, ofreciendo una gran versatilidad en su uso. Su capacidad para adoptar la forma del molde que lo contiene, su resistencia mecánica, su estabilidad ante el fuego o el aislamiento acústico que proporciona son algunas de sus características más apreciadas tradicionalmente (*Bellis.M,2001*).

El proceso de hormigonado cuenta con etapas que se deben seguir. La primera de ellas es elaborar el hormigón con todos sus componentes con la dosificación especificada para cada requerimiento, luego este se vierte dentro del encofrado respectivo y finalmente se realiza la compactación para que la mezcla se expanda por todos los rincones de dicho encofrado. Este último proceso es de gran importancia para la realización de un producto terminado de buena calidad, pero también es el responsable de un mal resultado si no se realiza de forma correcta (*Dehn et al, 2000*), es de muy claro conocimiento para los que manejan el rubro de la construcción, que hay lugares densamente armados como en el caso de juntas entre pilares y vigas o losas y muros donde realizar el proceso de vibrado para la compactación se hace difícil, suma dificultad también cuando la forma que hay que hormigonar no es de las convencionales o son estructuras muy esbeltas (*De la Peña, 2001*).

Buscando una solución a este conjunto de preocupaciones el Profesor Okamura de la Universidad de Tokio (Japón) introdujo en 1986 el concepto del Hormigón Autocompactante (HAC), promoviendo estudios sobre la trabajabilidad del hormigón que dieron lugar al primer prototipo en 1988 (*Okamura y Uchi, 1999*).

El Hormigón Autocompactante (denominado también por sus siglas HAC ) es un tipo de hormigón que se caracteriza por la capacidad que tiene la propiedad de fluir y rellenar cualquier parte del encofrado solamente por la acción de su propio peso, sin ser necesaria una compactación por medios mecánicos, de ahí su denominación auto-compactante (*Ahmed Loukili, 2011*).

En la actualidad el hormigón autocompactante es considerado como un “hormigón especial”, pero se cree que a medida que se vayan difundiendo sus ventajas y se expanda su uso, se transformará en el estándar del futuro (*M.A. Amhadi, 2007*).

Sus características de auto compactabilidad, que se explican especialmente por el uso indispensable de los aditivos super fluidificantes, permiten colocar este tipo de hormigón por simple vaciado y ser compactado únicamente por peso propio, eliminando las tradicionales labores de vibración de un hormigón tradicional(*De La Peña, 2001*). Esto último conlleva a lograr mejores rendimientos de colocación y un uso más eficiente de la mano de obra. Originalmente, en proyectos de centrales hidroeléctricas desarrollados con anterioridad se habían utilizado hormigones fluidos para la ejecución de obras confinadas (*Bartos, 2000*). Sin embargo, la excelente resistencia a la segregación y exudación que proporciona el hormigón autocompactante hizo inclinar la balanza hacia esta nueva tecnología, cuyo uso en Chile ha comenzado a masificarse gracias a la disponibilidad de aditivos de última generación (*B. de la Peña, 2011*).

Aunque este hormigón cuenta con grandes atributos este sistema no se ha masificado lo suficiente, y la elaboración de hormigón convencional sigue acarreando consecuencias ya que la utilización de vibradores para hormigón tradicional son además perjudiciales para sus operarios. Uno de los

inconvenientes es la propia vibración transmitida al operario, responsable de perturbaciones en la circulación sanguínea de las manos, dando lugar a una dolencia denominada “dedos blancos” (“White finger syndrom”). Por otro lado, los ruidos generados por los equipos de compactación, ya sean vibradores de aguja, vibradores acoplados al encofrado o mesas vibratorias, resultan incómodos y perjudiciales para los trabajadores y las personas que ocupan los espacios circundantes. Esto hace que la eliminación de la necesidad de vibrado beneficie el ambiente de trabajo y la salud laboral, lo que supondría un valor añadido en términos de la eficacia en la construcción (*Skarendahl y Petersson, 2000*).

Billberg (2001) indica que la reología del hormigón autocompactante debe ser optimizada desde la etapa de pasta y mortero hasta llegar al hormigón.

A pesar de que este hormigón autocompactante tiene características reológicas significativamente diferentes a las de los hormigones convencionales, ambos no difieren mucho en términos de su comportamiento en otros aspectos del estado fresco o en el estado endurecido. Sin embargo, se han observado (*Billberg, 1999; Skarendahl y Petersson, 2000*) que, en un HAC, la microestructura y las interfases áridopasta son más densas que en un hormigón convencional con la misma relación agua/cemento, que la permeabilidad a cloruros y gases es menor, y que la adherencia entre el hormigón y barras de armadura es mejor. Por otro lado, debido al contenido mayor de pasta, es esperable un aumento en la sensibilidad a un curado no adecuado, que puede conducir a la fisuración por retracción plástica en elementos como losas y pavimentos.

En nuestro país se han detectado problemas en estructuras de hormigón por retracción. Un estudio de la Universidad Católica de Chile analizó problemas frecuentes y sus causas, con lo cual concluyó que el 35% de los casos está relacionado con grietas producidas dentro de los primeros meses después del hormigonado identificándose la retracción hidráulica como el principal fenómeno causante del problema.

La retracción es un fenómeno intrínseco del hormigón, que está relacionado con la pérdida paulatina del agua en la mezcla. El fenómeno en cuestión, se refiere a que el hormigón experimenta variaciones de volumen, dilataciones o contracciones, durante su vida útil por causas físico químicas. La idea más importante que debe retenerse es que la retracción no es una fuerza impuesta sino que es una deformación impuesta al hormigón que provocará tensiones de tracción (*Neville, 1995*).

Algunos autores tales como *De Schutter, G. et al, 2008; Poppe, A. et al, 2005*, indican que la retracción es equivalente entre un HAC y un HC de similar resistencia a compresión. Otros autores que concluyen que la retracción es mayor en el HAC (*Chan, Y.W. et al. 2004; Xie, Y. et al. 2005*).

Assié et al. (2003) concluyeron que la retracción era ligeramente superior en el hormigón Autocompactante respecto al hormigón convencional.

Persson (2005) determinó que, debido al menor contenido de árido grueso en el hormigón Autocompactante, la retracción era aproximadamente un 20% mayor que en el convencional.

Nicol Vergara (2013) en su investigación determinó que para la misma razón agua/cemento la retracción es mayor en un hormigón autocompactante debido directamente con el aumento de la cantidad de finos y la disminución del tamaño máximo nominal del árido grueso.

La presencia de áridos en el hormigón restringe las deformaciones, ya que los áridos normalmente utilizados no sufren fluencia cuando son sometidos a las tensiones usuales de servicio en el hormigón (*Neville, 2002*).

La retracción hidráulica se considera uno de los problemas más serios encontrados en la construcción de hormigones, por lo que es importante tratar de controlar y reducir al máximo la retracción.

Lo que se propone en esta investigación está enfocada en realizar un análisis comparativo para determinar las características de los agregados que ayuden a disminuir el fenómeno de la retracción en los hormigones autocompactantes. La idea principal se basa en realizar probetas con una dosificación de un hormigón autocompactante patrón y así ir agregando o reemplazando distintos agregados y adiciones para analizar su retracción.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

- ❖ Evaluar la influencia que tienen en la retracción del hormigón autocompactante la incorporación de escoria de cobre como agregado grueso, vidrio como agregado fino y fibras de polipropileno como adición.

### 1.2.2 Particulares

- ❖ Determinar la retracción del hormigón autocompactante con el reemplazo de árido grueso por escoria de cobre.
- ❖ Determinar la retracción del hormigón autocompactante con el reemplazo del árido fino por vidrio reciclado.
- ❖ Determinar la retracción del hormigón autocompactante con adición de fibras de polipropileno Cave de tamaño máximo 12 mm.
- ❖ Desarrollar análisis comparativo de la retracción en el hormigón autocompactante con la incorporación de escoria de cobre y vidrio molido como agregados, además de fibras de polipropileno como adición.

### 1.3 Alcances

- ❖ El Hormigón se preparó en laboratorios de la Escuela de Construcción civil de la Universidad de Valparaíso con una cuidadosa dosificación.
- ❖ Se utilizará como tamaño máximo del árido 20 mm para impedir un bloqueo en las armaduras mientras se vierte el hormigón.
- ❖ Para cuantificar la retracción hidráulica se utilizará “El Método de Ensayo – Determinación de los cambios de longitud” , de acuerdo a la NCh 2221 of 2010,
- ❖ Las probetas para medir la retracción serán prismas rectangulares de 75 x 75 x 285 mm.
- ❖ Se utilizarán probetas cubicas de 150 x 150 x 150 mm para determinar la resistencia a compresión.
- ❖ Durante el desarrollo del procedimiento se mantendrán el tipo de cemento, tipo de agua y la granulometría de los áridos.
- ❖ Se utilizará cemento portland Puzolánico grado corriente.
- ❖ Se utilizará como árido fino vidrio reciclado con 20 y 60 % de reemplazo.
- ❖ Se adicionarán fibras de polipropileno, Cave. Su dosis de Adición será de 600 gr/m<sup>3</sup> y de 900 grs/ m<sup>3</sup>
- ❖ Se confeccionarán probetas con escoria de cobre como agregado grueso del hormigón autocompactante, en dosis de reemplazo del 20 y 60%.
- ❖ El aditivo a emplear es Fluidificante Sika Viscocrete 5100, su adición será de 0.64%.
- ❖ El período de estudio de la retracción hidráulica será de 90 días, teniendo 14 días de curado y 76 días de retracción.

## 1.4 Hipótesis

La retracción es una deformación impuesta al hormigón que genera tensiones de tracción, por lo que frente a esta problemática se plantea que con la adición de las Fibras de Polipropileno, el hormigón debería actuar de mejor manera y reducirla

## 1.5 Pregunta de investigación

¿Qué material será el que menos influya en la retracción en un Hormigón Autocompactante?

## 2. Marco teórico

### 2.1.- Hormigón autocompactante

En el hormigón convencional una compactación insuficiente tiene como consecuencia drástica de las prestaciones estructurales, independientemente de la calidad de la producción y de la propia composición del material. Como resultado, con frecuencia pueden verse en la superficie del hormigón zonas de compactación incompleta, exigiendo posteriormente trabajos de reparación, que pueden resultar costosos o de difícil ejecución. Mucho peor si esta mala compactación deja huecos en el interior de la estructura, en lugares donde es imposible visualizar y que disminuyen en gran cantidad la resistencia del material.

Los primeros desarrollos sobre hormigón autocompactante fueron realizados por el profesor Okamura en la Universidad de Tokio (Japón) en 1986, acuñando previamente en el nombre “ High Performance Concrete” y empleándose el termino hormigón autocompactante (Self Compacting Concrete). Unos años más tarde fue planteado como la solución para aumentar la durabilidad de las estructuras de hormigón y para racionalizar los sistemas constructivos. En 1988 el profesor Ozawa logró el primer prototipo de HAC.

Otros puntos por los cuales también se desarrolló este material son:

- a) Problemas para los trabajadores relacionados con el proceso de vibrado, ya que al evitar el vibrado del hormigón se reducen los daños generados a la salud por la llamada enfermedad de los dedos blandos que afecta específicamente a las manos no permitiéndole la adecuada circulación de sangre.
- b) La reducción en la mano de obra especializada en 1980, fue una de las problemáticas importantes que tomo en cuenta el profesor Okamura.
- c) Aumento de la vida útil de los moldes, pudiendo utilizar moldes más livianos y así reduciendo el tiempo y esfuerzo para la colocación de estos.
- d) Disminución de ruido provocado por los vibradores, genera menos molestias a las personas que colindan con construcciones.
- e) Una mejor terminación de las superficies, ahorrando tiempo y dinero en terminaciones finales que se realiza a un hormigón convencional (Walraven, 2001).

En la construcción en general el uso del HAC elimina los costes de compactación, y asegura que ésta sea adecuada.

Sin embargo, el coste total de construcción no siempre puede ser reducido, salvo en aplicaciones a gran escala. Esto es debido a que los sistemas convencionales de construcción están generalmente diseñados considerando que la vibración del hormigón es imprescindible.

A mediados de los 90 se expande su desarrollo a países europeos, especialmente en Suecia y Francia. Y a fines de los 90 se inician estudios y aplicación en los Estados Unidos. El hormigón autocompactante (HAC) es el material de mayor proyección en la industria de la construcción de la última década. En Argentina fue desarrollado en el año 2000 y aplicado con éxito en tres obras concretas en 2001. A partir de 2004 se ha incrementado el uso de este tipo de hormigones en diferentes elementos estructurales, ya sea por aspectos arquitectónicos (terminación

superficial, eliminación del “maquillaje”), técnicos (menor presión de bombeo, elevada congestión de armaduras) y económicos (optimización de mano de obra y equipos de vibración).

En Chile durante el año 1996 y 1997 se realizó el proyecto hidroeléctrico de la Central Ralco. En el Proyecto se colocaron más de 5.000 m<sup>3</sup> de hormigón autocompactante en los sectores de mayor complejidad tales como: pique en presión, chimenea de equilibrio y túneles blindados de la aducción, entre otros (<http://www.edicionesespeciales.elmercurio.com/destacadas/detalle/index.asp?idnoticia=0116092004021X0010003>). Así va evolucionando en nuestro país, por ejemplo, también se ha utilizado en la Escultura Federico Assler en la Escuela de Ingeniería de la U. de Chile, en el Santuario Padre Alberto Hurtado ubicado en Estación Central en Santiago y en la torre Titanium, el segundo rascacielos más grande de Chile que se construyó entre los años 2007-2010.

Aunque se desarrolló el proyecto Ralco en el año 1996 la tecnología del Hormigón Autocompactante junto con los aditivos químicos que se emplean en este hormigón, comenzó a ser introducida en Chile por Sika S.A. a comienzos del 2000. Desde esa fecha, el Hormigón Autocompactante ha estado utilizándose industrialmente en este país, principalmente en obras de edificación (De la Peña, 2000).

A continuación una tabla comparativa entre el uso de hormigón convencional y hormigón autocompactante para la construcción de vigas de fundación en la torre Titanium.

Tabla 1 : Tabla comparativa sobre las ventajas entre hormigón Autocompactante y hormigón Convencional.

	<b>H. Bombeado Tradicional</b>	<b>H. Autocompactante</b>
<b>M.O.(Concreteros)</b>	12	1
<b>Rendimiento (m3/hora)</b>	16	28
	<b>Faena de vibrado compleja</b>	<b>Facil colocación desde un punto de descarga</b>
	<b>Platachado final lento y con adiciones permanentes de agua para facilitar la terminación</b>	<b>Terminación final facilitada por las propiedades de autonivelación del producto</b>

Fuente: Tamara Orellana E.- Ingeniero Civil – Revista Cemento Melón

Lo que representa una reducción en mano de obra y un 75% de aumento en rendimiento de colocación.

Como se muestra en los párrafos anteriores, el aumento de la producción y utilización de este material va aumentando año a año, sus ventajas en comparación con hormigón convencional poco a poco van tomando fuerza tanto en el ámbito constructivo como en el ámbito económico, que aunque es más costoso, los tiempos y mano de obra necesaria es considerablemente menor y si la obra a construir es de gran magnitud es necesariamente adecuado un análisis económico de los beneficios que podría traer su utilización.

## 2.2.- Generalidades del hormigón autocompactante

**El hormigón autocompactante (HAC) es una mezcla de concreto** cuya característica principal es la capacidad de fluir y rellenar correctamente el volumen a hormigonar por la acción de su propio peso, es decir sin ayuda de ningún método de compactación (ACHE, 2008).

Okamura et al. (2000) quien bautizó el material como hormigón autocompactante de altas prestaciones dijo que este debía satisfacer los tres requisitos que se exponen a continuación.

- I. Primero, el hormigón debe fluir libremente por cada rincón del encofrado sin el uso de vibración.
- II. Segundo, los efectos derivados de la generación de calor, endurecimiento o retracción por secado deben ser mínimos.
- III. Tercero, la permeabilidad del hormigón frente la penetración del oxígeno, cloruros y agua debe ser mínima, lo cual obliga al uso de contenidos bajos de materiales cementicios y relaciones agua/cemento bajas (Billberg, 1999).

**Es por las siguientes razones por las cuales el HAC es uno de los materiales de construcción con mayor proyección y futuro del sector:**

- ❖ Una construcción más rápida
- ❖ Reducción de la mano de obra necesaria para la puesta en obra
- ❖ Un mejor acabado superficial
- ❖ Mayor facilidad de colocación
- ❖ Mejora de la durabilidad
- ❖ Mayor libertad y posibilidades en el diseño
- ❖ Secciones de hormigón más reducidas
- ❖ Reducción de los niveles de ruido, ausencia de vibraciones
- ❖ Un entorno de trabajo más seguro

La tecnología HAC se desarrolló originariamente en Japón y fue posible gracias a un desarrollo muy anterior de los aditivos superplastificantes para hormigón. En la actualidad, en Europa se ha adoptado el HAC con entusiasmo, tanto en el sector del hormigón prefabricado como en el hormigón preparado y obra civil. (EFNARC, 2002)

Los Hormigones Autocompactantes se logran gracias a los polímeros superplastificantes de tercera generación. Estos aditivos se dosifican en proporciones que van desde el 1% al 3% del peso del cemento y permiten reducciones de agua superiores al 30%. Lo anterior ha traído aparejado una disminución de la razón agua/cemento, que en casos excepcionales han llegado hasta un 0,30 aproximadamente. Como consecuencia de esta rebaja de razón agua/cemento, se obtiene alta resistencia a compresión a temprano y largo plazo, además de mayor durabilidad y facilidad de colocación en obra. (Solas y Giani, 2010)

Durante los últimos años se han realizado diversas investigaciones para desarrollar y mejorar el HAC y así con esto mejorar las condiciones de trabajo en la construcción y consigo mismo mejorar la calidad de la obra (Cremades, 2011)

Para el hormigón autocompactante se realizan distintos ensayos en los cuales tenemos:

- a) Ensayo tradicional del cono de Abrams, pero este no se mide en asentamiento sino que se deja escurrir y se mide el diámetro dejado por el flujo sobre la base. De esta forma se obtienen hasta 65 centímetros más de escurrimiento (De la peña, 2001).

- b) Ensayo Caja L, este ensayo permite observar las características de fluidez y cohesión de la mezcla. Para casos especiales se pueden fabricar maquetas con la forma y densidad de la armadura que simulen las condiciones de la obra para asegurar que el HAC diseñado llenara correctamente todos los espacios (De la peña, 2001).

Según una guía confeccionada por la empresa Ready Mix actualizada en el año 2012 el hormigón autocompactante presenta las siguientes propiedades:

- ❖ Resistencias a la compresión que varían desde 250 a 500 [kgf/cm<sup>2</sup>].
- ❖ Excelente fluidez sin segregación.
- ❖ Ecurrimiento promedio de 70 cm medido en cono de Abrams invertido según NCh 3113 of 2007.
- ❖ Tamaño máximo nominal del árido 20 mm.
- ❖ Granulometría de áridos según NCh 163 of 2013.
- ❖ Baja razón agua / cemento.
- ❖ Es bombeable
- ❖ Baja exudación

## 2.3 Composición

Los materiales utilizados en la fabricación de los HAC son los mismos que se emplean para un hormigón convencional, pero las proporciones utilizadas en su dosificación son distintas, especialmente en lo relativo al contenido en materiales finos, para evitar riesgos de segregación. Por otra parte, la utilización de aditivos superfluidificantes de última generación o reductores de agua de alto rango es imprescindible a la hora de obtener hormigones autocompactantes, ya que se busca la fluidez del hormigón pero sin prescindir de su calidad.

El principal rasgo distintivo del hormigón autocompactante frente al hormigón convencional es su comportamiento en estado fresco. Esta diferencia se debe fundamentalmente a su composición con un alto contenido de finos, aditivos de última generación en dosis mayores y una reducción del contenido de áridos gruesos (Bermejo, 2009).

### 2.3.1 Cemento

Para la fabricación de los HAC, se pueden utilizar todos los tipos cementos existentes en el mercado, la elección entre uno u otro debe estar asociada al tipo de aplicación del hormigón, de la calidad exigida al hormigón, de la disponibilidad en el mercado y de su finura. La cantidad adoptada puede variar de acuerdo con la calidad del hormigón que se desea obtener, con el contenido de adiciones y con el tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla.

Las cantidades de cemento utilizadas, no deben superar 500 Kg / m<sup>3</sup> debido a los riesgos de aumento en la retracción. Cuantías inferiores a los 350 Kg / m<sup>3</sup> solo resultan adecuadas si se incluye otro tipo de fino, como cenizas volantes, puzolanas, etc. En general el consumo suele estar entre 350 y 450 Kg/m<sup>3</sup> (EFNARC, 2002).

Según la Norma chilena 148 Of.68 los cementos se clasifican de acuerdo a su composición en las siguientes clases:

- 1) **Cemento portland**: producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso y que pueda aceptar hasta un 3% de otras materias, excluido el sulfato de calcio hidratado.
- 2) **Cemento portland siderúrgico**: Es el cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en un porcentaje no mayor al 30 %.
- 3) **Cemento portland puzolánico**: Es el cemento cuya composición tendrá puzolana en un porcentaje no mayor al 30 %.
- 4) **Cemento Siderúrgico**: Es el cemento que contiene escoria del alto horno en un porcentaje variable entre 30% y el 75%.
- 5) **Cemento Puzolánico**: Es el cemento que contiene puzolana en una proporción entre 30% y 50%.
- 6) **Cemento Con Fines especiales**: Son cementos en cuya composición se utilizan los productos normales de otro cemento, pero se establecen de acuerdo a lo exigido entre el cliente y el proveedor.

### 2.3.2 Áridos

Se pueden emplear los mismos áridos que para el hormigón convencional, ya que no se requiere de ninguna especificación físico-química en particular aunque se debe prestar una especial atención a la calidad y distribución de los tamaños de los mismos porque influirán en su comportamiento en el estado fresco del hormigón autocompactante (Bermejo, 2009).

Los agregados pétreos, tanto los finos como los gruesos que se utilizan para la fabricación de hormigones deben cumplir con las exigencias de la NCh 163 of 2013.

#### a) **Grava**

Las recomendaciones más usuales son de que este no debe superar los 20 mm (Okamura y Ozawa), (Izquierdo 2001).

La única limitación que existe para la grava es la separación entre armaduras, aunque generalmente los tamaños máximos habituales están comprendidos entre 12 y 16 mm. Así con esto se evita el problema de obstrucción o segregación al momento del paso entre las armaduras.

#### b) **Arena**

Se pueden emplear todas aquellas arenas que cumplan con las especificaciones que se establecen en la NCh 163 of 2013.

Sobre las arenas hay que tener en cuenta que, las arenas rodadas tienen una superficie que favorece la trabajabilidad del hormigón, mientras que las arenas machacadas poseen formas que aumentan considerablemente el rozamiento interno de la mezcla, por eso necesitan más agua para lograr los mismos resultados que los obtenidos con las arenas de río.

Generalmente el contenido de arena puede representar el 60-50 % de la cantidad de árido total, en función de la naturaleza y cantidad de la adición empleada y de cemento y de las características de la grava (Cremades, 2011).

#### c) **Filler**

Se pueden emplear todas aquellas arenas que cumplan con las especificaciones que se establecen en la NCh 163 of 2013.

### 2.3.3 Agua

El agua potable de la red puede emplearse como agua de amasado siempre que no se contamine antes de su uso. (NCh1498.Of.82) El agua potable se define como el agua que cumple con los requisitos físicos, químicos, radiactivos y bacteriológicos prescritos en esta norma, que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano. (NCh409-1.Of.84)

No se permite el empleo de agua que contenga azúcares como sacarosa, glucosa o similares. Pueden emplearse aguas de otro origen o procedencia o cuya calidad se desconozca, siempre que cumplan con los requisitos químicos básicos indicados en la tabla N° 1 de dicha norma. (NCh1498.Of.82)

El cemento mezclado con agua reacciona hidratándose. Ésta reacción libera una cierta cantidad de calor y provoca el progresivo endurecimiento de la pasta de cemento.

### 2.3.4 Aditivo

El aditivo es un producto químico que se usa en la fabricación del hormigón para mejorar sus propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido. Es un componente esencial en el hormigón autocompactante. Los aditivos más usados en la fabricación del hormigón autocompactante son los superplastificantes o aditivos reductores de agua de alta actividad y los cohesionantes o agentes modificadores de viscosidad las dosis varían entre un 0,1% y 5% del peso del cemento.

Básicamente son dos los tipos de aditivos utilizados para fabricar los HAC: los reductores de agua y los cohesionantes.

Los reductores de agua de alto rango o superplastificantes son imprescindibles en la dosificación de los HAC.

En la tabla 2: (Izquierdo – 2001) se muestra la evolución de tipos de aditivos a lo largo del tiempo. Desarrollo histórico.

Desarrollo histórico de la reducción de agua			
1930	1970	1990	2000
Ligno-sulfonatos	Melamina naftaleno	Polimeros vinilicos	Policarboxilatos
reducción de agua hasta un 10%	reducción de agua hasta un 20%	reducción de agua hasta un 30%	reducción de agua hasta un 40%

Se pueden emplear más de un tipo de aditivo y en ese caso, al igual que ocurre con el hormigón convencional, es conveniente realizar pruebas de compatibilidad entre ellos y de estos con el cemento.

Actualmente el empleo de los aditivos en los morteros y hormigones ha experimentado un gran incremento como consecuencia de la mejor calidad de los mismos. Puede decirse que, un porcentaje muy elevado del hormigón que se fabrica, lleva incorporado algún tipo de aditivo y que si estos son de calidad y están correctamente empleados, permiten conseguir hormigones dóciles, resistentes, durables y económicos.

**Clasificación de los aditivos según normativas y organismos.**❖ Clasificación de los aditivos según la norma ASTM 494

TIPO A: Reductor de agua

TIPO B: Retardador de fraguado

TIPO C: Acelerador de fraguado

TIPO D: Reductor de agua y retardador

TIPO E: Reductor de agua y acelerador

TIPO F: Reductor de agua de alto efecto

TIPO G: Reductor de agua de alto efecto y retardador

❖ Clasificación de los aditivos según el Centro Tecnológico del Hormigón (C.T.H)

Retardador de fraguado

Acelerador de fraguado y endurecimiento

Plastificante

Plastificante – retardador

Plastificante – acelerador

Superplastificante

Superplastificante retardador

❖ Clasificación de aditivos Según NCh 2182 of 95

Tipo A: Plastificante.

Tipo B: Retardador

Tipo C: Acelerador

Tipo D: Plastificante Retardador

Tipo E: Plastificante Acelerador

Tipo F: Superplastificante

Tipo G: Superplastificante Retardador

### **Fluidificante**

Corresponden a una nueva generación de aditivos plastificadores en base a productos melamínicos o naftalínicos, constituyendo una evolución de los aditivos reductores de agua, que en la adsorción y capacidad de dispersión del cemento es mucho más acentuada.

Para entender mejor el funcionamiento de estos aditivos se hace preciso recordar el comportamiento agua-cemento en el proceso de mezclado y fraguado del hormigón. Como sabemos, primero se forma la pasta aglutinante producto de la lubricación de las partículas de cemento y de árido tras la adsorción del agua, y luego esta pasta se vuelve cementante producto de la reacción química que se lleva a cabo entre ambas al iniciarse el fraguado.

En la primera de estas etapas es cuando se produce la mezcla de los componentes y las primeras reacciones electroquímicas entre agua y cemento, apareciendo las características del hormigón fresco como trabajabilidad, docilidad, consistencia, etc.

Estas características están gobernadas principalmente por las reacciones electroquímicas producidas entre las moléculas de agua y los granos de cemento, los que poseen un gran número de iones en disolución en su superficie. Estos iones tienden a formar, debido a una afinidad electrostática, flóculos o capas de solvatación al entrar en contacto con el agua durante la operación de amasado. Dichos flóculos ejercen dos efectos nocivos en la masa de hormigón.

- ◇ Impiden la dispersión uniforme de las partículas de cemento en la masa de hormigón.
- ◇ Retienen cierta cantidad de agua en el interior de su masa que incide negativamente en la porosidad final del material por no ser utilizable para lubricar la masa ni para la lubricación de los granos de cemento.

Los efectos nocivos de la floculación pueden ser contrarrestados, al menos en parte, mediante la incorporación a la masa de hormigón de ciertos compuestos químicos tales como policondensados de naftaleno y superplastificantes, reductores de agua de alto rango o superfluidificantes.

Estas adiciones actúan neutralizando las cargas eléctricas que se encuentran sobre la superficie de las partículas de cemento y, por consiguiente, evitando la formación de flóculos. La forma lineal y alargada de estas moléculas orgánicas les permite recubrir por completo la superficie de los granos de cemento incorporándole cargas de signo negativo, provocando una fuerza de repulsión entre las partículas de cemento dificultando el fenómeno de la floculación.

Sin embargo como consecuencia del efecto envolvente de estas moléculas puede ocurrir que, en altas dosis se produzca un efecto de retardo de la hidratación de los granos.

En el modo de acción de los Fluidificantes pueden considerarse tres etapas consecutivas:

- ◇ Adsorción de los polímeros por parte de las partículas de cemento en la etapa de transición sólido-líquido.
- ◇ Carga de la superficie de los granos con fuerzas electrostáticas de repulsión por tener el mismo signo.
- ◇ Aparición de tensiones superficiales que aumentan la distancia entre partículas.

Los fluidificantes permiten conseguir una adecuada trabajabilidad y fluidez en el hormigón a pesar del alto contenido de finos que poseen estos hormigones, haciendo que la mezcla tenga una mayor viscosidad y requiera de un menor contenido de agua.

El aditivo fluidificante es un componente imprescindible para el HAC, y también se puede escoger de entre los que estén disponibles en el mercado.

Los aditivos fluidificantes o superfluidificantes aumenta fuertemente la docilidad permitiendo reducir el agua de amasado para docilidad constante con alto incremento de resistencia, se aplica mayoritariamente para hormigonado de piezas estrechas y difícilmente accesible, hormigonado en tiempo caluroso, hormigones bombeados, de alta resistencia, hormigones para prefabricados y reparaciones, aunque presenta una limitación con respecto al tiempo que dura su efecto el cual es breve (Manuel Fernández Canovas, ICH)

### 2.3.5 Adiciones

En la bibliografía se puede encontrar distintas opiniones en relación al tamaño de partícula a partir del cual se define un material como fino (tabla 3). La tendencia general es que este parámetro se fije en 0.125 mm. En este trabajo serán considerados “finos” todas las partículas inferiores a 0.125 mm independientemente de su procedencia.

Los finos tienen como principal función dar cohesión y evitar la segregación de la mezcla. Su utilización es necesaria en la mayoría de las dosificaciones, pero en algunos casos pueden ser sustituidas, bien por aditivos cohesionantes (Ambroise y Pera – 2001), (Alcantara - 2001), (Petersson – 1999), o bien por los propios finos aportados por los áridos. Los materiales más utilizados para incrementar el volumen de finos en los HAC suelen ser las cenizas volantes y humo de sílice (Gomes – 2002), o inertes como el filler calizo (Bilberg – 1999), silicio o la marmolina (Alcantara – 2001) en función de las posibilidades de suministro de la zona y del costo.

Tabla 3: Autores opinan sobre tamaño de la partícula que define un material como fino.

	Okamura (1990)	Ozawa (1990)	Sari (1999)	Gomes (2002)	Izquierdo (2001)	European Guidelines (2006)
Finos (mm)	<0.090	<0.090	<0.150	<0.080	<0.125	<0.125

La bibliografía internacional se encuentra una amplia relación de referencia en las que se ha empleado con éxito otras adiciones tanto en hormigón tradicional como en HAC (Edamatsu, Nishida y Uchi 1999, Domone y Chay 1997, Ho 2002, Esping 2003).

Las adiciones se clasifican de acuerdo con su hidraulicidad.

La tabla extraída de la Guía Europea para HAC (2005) presenta estas clasificaciones.

Tabla 4: Clasificación de las adiciones en función de su hidraulicidad.

<b>Tipo 1</b>	Inertes o Seminertes	Filler mineral (piedra caliza, dolomía, etc.) Pigmentos
<b>Tipo 2</b>	Puzolanas	Cenizas volantes conforme la EN 450 Humo de sílice conforme la PNE-prEN 13263
	Hidráulicamente activas	Escoria granulada de alto horno

El empleo de adición es prácticamente obligatorio para satisfacer la demanda de finos que requiere el hormigón autocompactante. Dentro de lo que se entiende como adición para hormigón autocompactante se incluye también la aportación de finos o filler por parte de las arenas, en general el que pase por el tamiz 0.08 o 0.063.

Sobre la naturaleza de la adición, no existe limitación. Cenizas volantes, filler calizo (o de otra naturaleza), microsílíce, etc. Son perfectamente utilizables.

En general, las cenizas volantes ofrecen grandes resultados en aplicaciones donde no se demande elevada resistencia inicial o se requiere elevado mantenimiento de la consistencia. Contrariamente no presentan la mejor opción en uso para prefabricados.

El empleo de cenizas permite trabajar con cantidades de cemento más ajustadas debido a su puzolanidad pero debe asegurarse que la calidad de la ceniza sea la óptima. Cenizas con elevado contenido de residuo no quemado pueden provocar manchas negras en la superficie del hormigón, ya que estos, por diferencia de densidades y apoyado por la elevada fluidez del hormigón autocompactante, emergen con facilidad a la superficie.

En el campo del prefabricado y en general donde la demanda de resistencia inicial sea elevada, la adición más recomendada es el filler. El empleo de adición no reactiva implica trabajar con mayores cantidades de cemento, pero como normalmente en este tipo de aplicaciones ya se trabaja con cantidades elevadas de cemento, no representa un problema importante.

La microsílíce, por su parte, puede ser empleada en cualquier tipo de aplicación y a pesar de que ofrece buenos resultados, tiene alguna limitación. En primer lugar, su cantidad está limitada por motivos de resistencia a flexión, motivos económicos y por su elevada demanda de agua. Trabajar con microsílíce en las cantidades típicas, no es suficiente para satisfacer la demanda de finos a no ser que la cantidad de cemento sea elevada y demande mayor cantidad de aditivo superfluidificante por su elevado efecto cohesionante. Otra razón que limita el empleo de microsílíce es la alteración del aspecto (color) del hormigón a no ser que se emplee microsílíce blanca.

## **2.4.- Comportamiento del hormigón.**

### **2.4.1.- Hormigón fresco**

La autocompactabilidad es la principal propiedad en estado fresco del hormigón autocompactante, y que lo diferencia del hormigón convencional.

La evaluación de las propiedades en estado fresco del hormigón autocompactante se puede realizar de dos maneras. La primera es mediante el estudio de los parámetros reológicos y, la segunda es mediante la realización de ensayos.

Las características en estado fresco que se deben de cumplir simultáneamente en un hormigón son las siguientes:

- ❖ Capacidad de fluir y llenar el encofrado sin ayuda externa.
- ❖ Resistencia al bloqueo o capacidad de pasar entre las barras de armadura.
- ❖ Resistencia a la segregación que le permite alcanzar finalmente una distribución uniforme del árido en toda su masa.

Entre métodos de ensayo propuestos para evaluar la capacidad de autocompactación del hormigón, se destacan el escurrimiento de cono de Abrams invertido y la caja L en ambos ensayos se debe cumplir con rangos en tiempo de escurrimiento del hormigón al ser vaciado dentro de estos moldes, manteniendo la autocompactabilidad sin segregar y sin exudar.

### **2.4.2.- Hormigón endurecido**

Después de su vertido, el hormigón pasa de estado fresco a endurecido, perdiendo lentamente humedad y adquiriendo dureza. A medida que el hormigón experimenta este cambio de endurecimiento progresivo, se transforma de material plástico a sólido, mediante un proceso físico químico y de larga duración (años).

Los resultados en probetas moldeadas así como los de testigos extraídos de diferentes zonas de estructuras endurecidas, demuestran que las propiedades del Hormigón Autocompactante en estado endurecido son similares o superiores a las del hormigón tradicional que ha sido vibrado (Gibbs y Zhu, 1999).

## 2.5 Retracción en el hormigón

### 2.5.1.- Retracción Hidráulica

La retracción se define como un fenómeno intrínseco del hormigón, en el cual este material cambia su volumen con el paso del tiempo y está relacionado con la pérdida paulatina del agua o cambios físicos y químicos en la mezcla (Munizaga, 2009; García, 2011).

El hormigón endurecido, como cualquier material poroso, posee la propiedad de absorber agua desde el medio ambiente o evaporar agua desde su masa, hasta equilibrar su humedad interna con la del ambiente que lo rodea, (humedad de equilibrio), lo que trae como consecuencia variaciones constantes del contenido de agua presente en poros y capilares.

Cuando el proceso implica una pérdida de agua, en la masa del hormigón, necesariamente se produce una reducción de su volumen denominada retracción hidráulica, y el fenómeno que es contrario es aumento de volumen generado por la absorción de agua, el que se conoce como entumecimiento.

La idea más importante que debe retenerse es que la retracción no es una fuerza impuesta sino que es una deformación impuesta al hormigón que provocará tensiones de tracción.

#### Tipos de retracción

Se pueden identificar 5 tipos de retracción, estas son: retracción plástica, retracción autógena, retracción por secado, retracción por carbonatación, retracción térmica (Videla y Aguilar, 1999).

##### **2.5.1.1 Retracción plástica**

Se produce cuando la pasta de cemento es plástica y experimenta una retracción volumétrica, cuya magnitud es del orden de 1% del volumen total del cemento deshidratado (García, 2011). Esta reducción se conoce como retracción plástica, porque se presenta mientras el hormigón está todavía en estado plástico y aún no ha adquirido resistencias significativas, la pérdida de agua por evaporación de la superficie del hormigón agrava la retracción plástica y puede llevar a un agrietamiento superficial. Sin embargo, si se evita por completo la evaporación inmediatamente después de la colocación del hormigón, se elimina el agrietamiento.

##### **2.5.1.2 Retracción autógena**

La retracción autógena se diferencia de los otros tipos de retracción, ya que no se atribuye a la pérdida de agua, sino que a la reducción de volumen que esta experimenta al combinarse químicamente con el cemento.

Esta reducción de volumen de no existir aportes de agua externos que permitan compensarla, da origen a poros de vacío en la masa del hormigón y en consecuencia a fuerzas capilares capaces de generar retracción. La magnitud de este tipo de retracción en hormigones normales varía entre 50 y 100 micrones por metro según Neville (1995), no es necesario tomarla en cuenta como factor independiente de la retracción, ya que es muy pequeña.

### **2.5.1.3 Retracción por carbonatación**

La retracción por carbonatación es producida por la reacción del CO<sub>2</sub> atmosférico, que penetra y se disuelve en el agua que contiene los capilares, con el hidróxido de calcio, contenido en la solución para formar el carbonato de calcio más agua (Giani et al, 2008). Esta combinación química que tiene un carácter contractivo, ya que disuelve el agua que contiene los capilares, por lo cual el espesor de hormigón afectado por él disminuye su volumen inicial, generándose la denominada retracción por carbonatación. El espesor afectado a contracción es pequeño, alcanzando solo algunos milímetros. Sin embargo, por el confinamiento que produce el hormigón interior adyacente, esa capa queda sometida a tensiones de tracción, pudiendo fisurarse.

### **2.5.1.4 Retracción térmica**

El hormigón puede experimentar cambios de volúmenes causados por la temperatura y estos pueden ser importantes en los primeros días después de la colocación del hormigón, en el cual se produce calor por la hidratación del cemento aumentando la temperatura, y durante su enfriado subsiguiente el hormigón experimenta una retracción el cual genera esfuerzos de tensores (Castaño, 2009)

En general estos casos suelen ser atípicos por lo que deben ser estudiados caso a caso y no producen riesgos estructurales.

### **2.5.1.5 Retracción por secado o hidráulica.**

Este tipo de retracción hidráulica o también denominada retracción por secado, se produce por la pérdida paulatina de agua por los poros y capilares en la mezcla de hormigones o morteros.

Mehta (2006, Op cit, García, 2011) señala más precisamente que la retracción hidráulica se produce debido a un gradiente higrométrico con el aire circundante, si el entorno cuenta con una humedad relativa menor que la presente en el interior del hormigón este material tiende a contraerse, produciendo el fenómeno de retracción. Al cambiar las condiciones de humedad exterior a la probeta, si se encuentra más húmedo el entorno la probeta se hincha y se obtiene un aumento de su volumen.

El cambio de volumen genera esfuerzos de tracción produciendo fisuras y grietas, por lo que los estudios para predecir con certeza la deformación producida por retracción hidráulica es de suma importancia para que las estructuras no presenten problemas de durabilidad y servicialidad ya que generan un impacto técnico, económico y de calidad en las obras de construcción en hormigón (Videla y Aguilar, 2005).

A edades tempranas es importante el proceso de curado, ya que de no existir aportes de agua externos que permitan compensar la pérdida de agua en un principio, se da origen a poros de vacío en la masa de hormigón, y que la consecuencia es que se generan problemas de retracción en una temprana edad (Giani et al, 2008).

Simplificando la idea la retracción hidráulica está relacionada principalmente con la remoción de agua absorbida de la pasta de cemento hidratada, entonces el gradiente de humedad con el medio ambiente es el responsable de este fenómeno.

## **2.5.2.- Variables relevantes que influyen en la retracción**

Los principales factores que influyen sobre la retracción desde el punto de vista de la dosificación del hormigón son:

### **2.5.2.1 Cemento:**

El fenómeno de retracción hidráulica como ya está explicado anteriormente se produce por la pérdida de agua en la pasta de cemento hidratada, por lo que resulta evidente la trascendencia de las características del cemento en este fenómeno.

Según Neville (1996), las propiedades y composición química del cemento tendrían poca relevancia en la magnitud de la retracción hidráulica de hormigones, aunque si afectaría la retracción de la pasta.

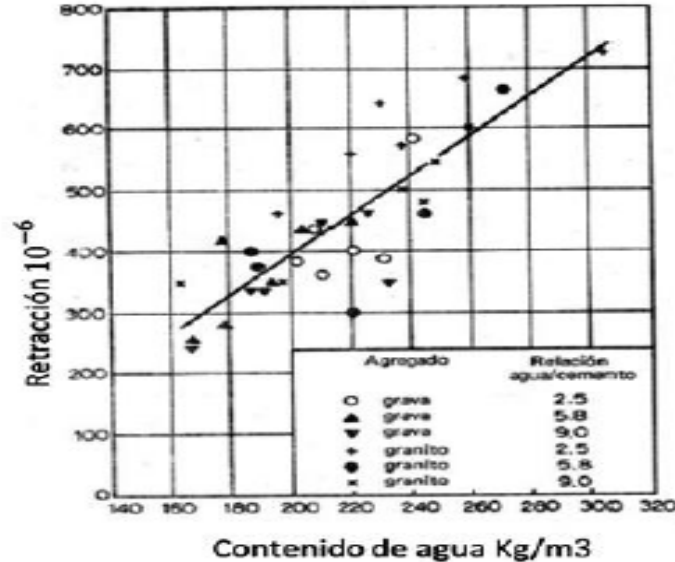
Pero anteriormente en 1987 Metha, señaló que a igualdad de dosis los hormigones elaborados con cemento portland Puzolánico, que contienen puzolanas naturales, presentan una mayor retracción que los Portland puros, hecho que aparentemente concuerda con los valores obtenidos sobre cemento nacionales, por los investigadores de la Universidad Católica De Chile, Videla y Aguilar (2000).

Sin embargo hay que tener en cuenta que los mismos estudios de Videla y Aguilar, demuestran que los cementos Portland Puzolánicos presentan una retracción inicial muy rápida y que tiende a reducirse y estabilizarse en el tiempo, mientras que los cementos Portland puros es inicialmente más lenta y estable pero se mantiene por mayor tiempo, lo que a la larga iguala las diferencias.

### **2.5.2.2 Relación A/C y dosis de agua:**

El contenido de agua afecta también la retracción del hormigón, mientras más alta es la razón agua/cemento mayor es la retracción hidráulica, ya que establece la cantidad de agua evaporable en la pasta de cemento y la velocidad con la que esta llega a la superficie expuesta (Neville, 1995).

Figura 1: Relación entre el contenido de agua en el hormigón fresco y la retracción por secado.



Pero si aceptamos que la retracción depende de la cantidad de agua evaporable, resulta evidente que es el volumen total de agua de amasado, más que la relación agua/cemento, lo que condiciona la retracción hidráulica (Solás y Giani, 2010).

### 2.5.2.3 Agregados pétreos:

Los áridos poseen una gran importancia en la estabilidad volumétrica de la mezcla, ya que estos restringen la libre retracción de la pasta de cemento y un mayor porcentaje de estos en el hormigón permite usar una mezcla más pobre, y por lo tanto se produce una retracción menor, (Castaño, 2009) observa que un mayor contenido de áridos y con buenas características como dureza, baja absorción, alta densidad, y superficie rugosa favorecen el control de la retracción, puesto que restringen las deformaciones que se presentan en la pasta de cemento.

El incremento de tamaño máximo del árido utilizado permite reducir la superficie específica del árido y por consecuencia los requerimientos de agua y cemento, lo que a su vez, aumenta el contenido de inertes por unidad de volumen del hormigón, hechos que se traducen en un incremento de la restricción interna y por ende una menor retracción hidráulica (Solás y Giani, 2010).

Varela y Aguilar (1999) encontraron una reducción de los valores de retracción hidráulica del 17% en hormigones confeccionados con cementos nacionales y un tamaño máximo nominal de 40 mm, en comparación con hormigones de iguales resistencias mecánicas y docilidad elaborados con un tamaño máximo nominal de 20 mm.

Por esto se concluye que el agregado pétreo sería el parámetro de dosificación más relevante en el control de la retracción.

### a) Vidrio reciclado.

Con el fin de desarrollar hormigones de características especiales, hoy en día la tecnología del hormigón presenta muchas variaciones a los sistemas convencionales de cemento portland, agua y agregados. Ingredientes como las cenizas volantes, la escoria granulada de alto horno, microsilica, puzolanas naturales, aditivos químicos reductores de agua, fibras y agregados artificiales entre otros, son utilizados de manera regular y no constituyen aplicaciones especiales (Mehta y Monteiro, 1993; Neville, 1996; Kosmatka et al., 2002; Mindess et al., 2003).

El vidrio es un material sólido frágil y transparente o translúcido y que por características es fácilmente recuperable, el envase de vidrio es 100% reciclable, es decir que a partir de un envase utilizado, puede fabricarse uno nuevo que puede tener las mismas características del primero (Martínez Ramírez, 1993).

El vidrio común o vidrio base también denominado vidrio de silicato sodocálcico, está compuesto principalmente por: (Si O<sub>2</sub>) (Ca) (Na)

El cristal de ventana clara y lámpara fluorescente, como vidrio reciclado ( con muy pequeñas cantidades de contaminantes), se ha utilizado en aplicaciones de hormigón con vidrio tales como :

- ❖ Ciclovías
- ❖ Aceras
- ❖ Cunetas
- ❖ Trabajos análogos no estructurales

Tipos de Vidrio:

El vidrio se puede clasificar en dos tipos, por su aplicación y por su color:

- ❖ El vidrio según su aplicación:
  - Vidrio Industrial: Se entiende por todo vidrio industrial lo que su utilización no está destinada a envases de productos alimenticios (almacenamientos de productos químicos, biológicos, vidrios planos como ventanas, cristales, etc.)
  - Vidrio Doméstico: Se entiende como vidrio domestico el que se emplea para almacenar productos alimenticios (conservas, vinos, yogurt, etc.) aunque de manera más general, es el vidrio que se deposita en los contenedores ubicados en la ciudad.
- ❖ El vidrio según el color:
  - El vidrio verde (60%): Utilizado masivamente en botellas de vino, cava, licores y cerveza, aunque en menor cantidad en este último.
  - El vidrio blanco (25%): Usado en bebidas gaseosas, zumo y alimentación en general.

- El vidrio extra claro (10%): Empleado esencialmente en aguas minerales, tarros y botellas de decoración.
- El vidrio opaco (5%): Aplicado en cervezas y algunas botellas de laboratorio.

En esta investigación se utilizará el vidrio del tipo doméstico que se encuentra en mayores cantidades, aportando con esto también al medio ambiente.

El vidrio reciclado como agregado, es un árido reactivo, el cual es muy propenso a producir RAS (reacción álcalis sílice), que se puede mejorar por el uso de una puzolana para reemplazar el 20 a 30% del cemento, que forman un gel no expansivo en la matriz del hormigón. También la RAS se puede prevenir usando cementos muy bajos en su nivel alcalino, o por la colocación del hormigón en un ambiente totalmente seco, donde la humedad no pueda llegar (Vitro minerals, 2010).

Según Hugo Barrera debido a la reacción álcalis-sílice se estudió la cantidad de vidrio a utilizar en la mezcla. El vidrio triturado a usar tiene que pasar por el tamiz de abertura de 0,63 mm, para que no exista una RAS. En base a esto demostró que un hormigón elaborado con 100% de agregado de vidrio presenta una disminución de un 20% a la compresión, en comparación con un hormigón fabricado con áridos naturales (Hugo Barrera, 2012).

La Reacción álcali-árido se ha descubierto mayormente ya que con el tiempo se han dado cuenta de la existencia de una mayor cantidad de áridos reactivos, susceptibles a reaccionar de forma expansiva con los álcalis del cemento.

Los agregados que contienen ciertos constituyentes pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos en el concreto. La reactividad es potencialmente perjudicial solo cuando produce una expansión significativa (Mather, 1975). La actividad álcali – agregado (RAA) se presenta de dos formas:

- I. RAS (reacción álcali-sílice): Esta reacción es más preocupante porque la cantidad de agregados o minerales reactivos de sílice es más común.
- II. RAC (reacción álcali-carbonato: Los agregados de carbonatos reactivos con álcalis tienen una composición específica que no es muy común.

La sustitución de una parte del Clinker por puzolanas o ceniza volante rebaja el contenido de álcalis en el cemento, lo recomendable es hacer un estudio de los áridos ya que conociendo estos y utilizados conscientemente y racionalmente por los fabricantes de hormigón, poco o nada importa la cantidad de álcalis del cemento. (Veronelli, 1978)

Hay varios parámetros que influyen en la RAS, estos son:

- ❖ Árido: según su estado cristalino, y los hidróxidos liberados por el cemento.
- ❖ Velocidades de reacción: determinados por la dosificación de la masa.
- ❖ Intercambios iónicos: características químicas de los elementos en contacto.
- ❖ Temperatura: definida por el medio ambiente.

Una de las características más importantes del vidrio es su nula absorción de agua y es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas (Alaejos y Fernández 1996).

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2.2 y 3.1) y carecer de alguna clase granulométrica. Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3.1 (arena gruesa), en donde puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado (Uribe 1991).

#### b) Escoria de Cobre.

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho a partir del proceso pirometalúrgico. Durante la fundición del mineral concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se pueden clasificar como: mata rica en cobre (sulfuro) y la escoria (óxido). La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas. En las etapas de recuperación de cobre en hornos de limpieza y HLE es posible recuperar el cobre contenido en escorias de alta ley, las que se encuentran entre el 4 – 10% de cobre, que provienen de los procesos de fusión (horno) o conversión. Actualmente Chile se usan tres procesos para el tratamiento de escorias para obtener una escoria con una ley lo más baja posible de cobre. Estos procesos son:

- a) Hornos eléctricos
- b) Plantas de flotación
- c) Hornos de limpieza tipo Teniente u hornos HLE

Los hornos eléctricos y los tipos Teniente son esencialmente el mismo proceso, pues se busca lograr la reducción del contenido de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en la escoria. Esto se realiza a través de un agente sólido, líquido o gaseoso (carbono, hidrógeno y algo de azufre), así cambiando las características químicas y físicas de la escoria. Posteriormente esta mezcla se deja sedimentar, obteniendo así una fase rica en cobre (50-70%) que es devuelta a los convertidores y una escoria de descarte que es llevada a botaderos (0,7-1%).

El horno de tratamiento de escoria posee las siguientes etapas:

- 1) Carga del horno
- 2) Reducción de la magnetita: esta etapa se traduce en una disminución de la viscosidad de la escoria, permitiendo así la separación de las fases contenidas en la escoria. Para lograr esta separación se trabaja con hornos a temperaturas superiores a los 1200 °C, y debido a

que las reacciones involucradas en esta etapa son endotérmicas, es necesario generar calor mediante quemadores.

3) Sedimentación: esta etapa es necesaria para separar las distintas fases que se producen en la limpieza de la escoria, y es posible pues las partículas con contenido sulfuro-metálico poseen mayor densidad que la escoria. Durante esta etapa es necesario mantener la temperatura del horno, y el tiempo de sedimentación varía entre los 30 y 60 minutos.

El tamaño de los botaderos de escoria va creciendo año a año, por lo que el tema de la reutilización de escorias se ha convertido en un punto de gran interés para las empresas metalúrgicas. Anualmente las fundiciones de cobre del país producen cerca de 4,5 millones de toneladas de desechos, cuyo único destino posible son los depósitos que se sitúan cerca de las plantas. Estudios realizados por diversas universidades nacionales han determinado que por cada tonelada de cobre producido se generan aproximadamente 2,2 toneladas de escoria, y que tan sólo la División del Teniente, Codelco, produce cerca de 700.000 toneladas de escoria al año. Se estima que Chile posee un volumen histórico acumulado de aproximadamente 50 millones de toneladas. [Sepúlveda06] Entre las principales empresas a nivel nacional productoras de escoria de cobre se encuentran las fundiciones de Codelco (Chuquicamata, Potrerillos, Ventanas, Paipote y Caletones), de Angloamerican Chile (Chagres) y de Falconbridge (Altonorte), (2010).

### Características de la escoria de fundición

La escoria se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso piro-metalúrgico. Depende de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de operación y de otros diversos factores. Los óxidos fundamentales que se presentan en la escoria son:

- Óxidos de hierro (FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) de 30 – 40 %
- Óxidos de silicio (SiO<sub>2</sub>) de 35 – 40 %
- Óxidos de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) hasta 10 %
- Óxido de calcio (CaO) hasta 10 % 24

De la literatura se ha podido obtener que las escorias están compuestas por diversos elementos, en la Tabla 5 se muestra un análisis químico de rutina que se efectúa regularmente por el laboratorio de Control de la Calidad de División Ventanas Codelco a la escoria del depósito, la cual es de interés para la presente investigación.

Tabla 5: Componentes de la Escoria de cobre.

COMPONENTE	SIMBOLO	COMPOSICION
Cobre	Cu	0.800 %
Arsénico	As	0.006 %
Antimonio	Sb	0.008 %
Sílice	SiO <sub>2</sub>	25950%
Azufre	S	0.372 %
Hierro	Fe	41760%
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10.00%

Figura 2: Escoria de Cobre en depósito de Ventanas.



Fuente : Elaboración Propia

Una de las características que más nos interesa en esta investigación es la densidad de la escoria de cobre, que está entre 1,8 y 2,6.

Según Hammer et al. (2001) la distribución del tamaño del árido influye significativamente en la retracción del hormigón.

La forma de los agregados tiene incidencia sobre la trabajabilidad del concreto fresco. Las formas básicas de éstos se pueden simplificar en 4 tipos, que son: equidimensional o esférica, prismática, tabular o elíptica, e irregular. De todas éstas, la que mayor problema puede ocasionar para la trabajabilidad es aquella de tipo tabular que además está alargada (conocidas como piezas planas y alargadas); estas piezas pueden provocar disminución en la trabajabilidad ya que muy fácilmente pueden orientarse de manera preferencial en un solo plano, de manera que el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas. Además, gravas con esta forma ocasionan mayores requerimientos de arena, y eso hace necesario un incremento en el volumen de agua para la mezcla (Uribe 1991). Es deseable, entonces, que los agregados particularmente los gruesos tengan una forma un tanto angular y cúbica (Chan 1993).

En cuanto a la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la textura superficial de éste es principalmente responsable de la adherencia. La roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado; aunque en la adherencia también tiene influencia la relación  $a/c$  que afecta tanto física como químicamente la zona de interface. En un trabajo de investigación de Ozturan y CeCen se encontró que hormigones fabricados con agregados triturados resistieron más que los de canto rodado; el esfuerzo de compresión a los 28 días para los hormigones hechos con agregados gruesos de grava redonda estuvo entre el 10 y 20% más bajos que los hormigones preparados con agregados triturados. Lo anterior puede ser atribuido tanto a la superficie lisa de los agregados de canto rodado, como a su posible menor resistencia, en relación a los agregados triturados, que fueron de basalto y caliza. (Özturan y Çeçen 1997).

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad ( $\geq 2.25$ ) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla.

Por otro lado, es conocido que a mayor porosidad mayor fuerza de adhesión, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad, y como consecuencia menor adherencia y cantidad de finos que pasan por la malla N° 200 (Cerón et al. 1996).

Los agregados actúan para restringir la contracción de la pasta de cemento, es por esto que el hormigón con un alto contenido de agregado grueso es menos vulnerable a la contracción (Bentz y Snyder, 2001).

Persson (2005) determinó que, debido al menor contenido de árido grueso en el hormigón autocompactante, la retracción era aproximadamente un 20% mayor que en el convencional.

También el grado de restricción de un hormigón está determinado por las propiedades de los agregados, por ejemplo los con alto módulo de elasticidad o con superficies ásperas son más resistentes al proceso de contracción, en pocas palabras, mientras más grande y compacto sea el agregado menor contracción habrá (Bentz y Snyder, 1999).

Es por esto último por lo cual he decidido agregar escoria de cobre al hormigón autocompactante, disminuyendo así su problema de retracción, el reemplazo será en un tamiz no superior a los 20 mm para que la mezcla sea homogénea y no quede el árido trabado entre las enfierraduras al vaciar el hormigón, se podrán usar tamices superiores siempre y cuando el espacio entre enfierraduras supere el tamaño del árido a emplear.

#### **2.5.2.4 Aditivos y adiciones:**

Los tipos de aditivos en el hormigón tienen distintos efectos en el fenómeno de la retracción, como:

- ❖ Los aditivos plastificantes y reductores de agua, normalmente no tienen un efecto considerable en la reducción de la retracción por secado y que incluso pueden tener efectos negativos sobre la retracción a temprana edad.
- ❖ Los incorporadores de aire pueden incrementar la retracción, probablemente debido al efecto de reducción de restricción interna, que el aire incorporado puede implicar, sin embargo como su uso permite reducir la dosis de agua, siempre que la incorporación de aire no supere los 5%, aparentemente no afectan significativamente la retracción.
- ❖ Los acelerantes elaborados con cloruro de calcio, incrementan la retracción sobre todo en las primeras edades.

- ❖ Las adiciones de puzolana natural frecuentemente incrementan los requerimientos de agua, lo que normalmente implica un aumento de la retracción hidráulica.

#### a) Adición de fibras de polipropileno, Cave

Los avances tecnológicos han permitido el diseño y producción de nuevos materiales sintéticos con características específicas. Estos desarrollos logran que en la actualidad, existan materiales diseñados para cumplir funciones que antes eran reservadas exclusivamente para los materiales tradicionales, o que materiales como el concreto mejoren sus cualidades.

El desarrollo de los refuerzos de distintos tipos de fibras para hormigones comienza a comienzos de 1960.

El concreto hecho con cemento Portland tiene ciertas características: es relativamente resistente en compresión pero débil en tensión y tiende a ser frágil. La debilidad en tensión puede ser superada por el uso de refuerzos como por ejemplo la inclusión de ciertas fibras. En la práctica actual de la construcción, fibras discontinuas se añaden a las matrices de cemento en fracciones de volumen relativamente bajo (generalmente menores a 2%), principalmente para mejorar la dureza y el agrietamiento. Las dosificaciones utilizadas en el concreto reforzado con fibras sintéticas varía de 2.1 kg a 6.3 kg por metro cúbico, representando un ahorro considerable, tanto por el costo de las mismas como por la disminución del rebote del concreto lanzado y, por consiguiente, de desperdicio (IMCYC, "Premezclados: Concreto con fibras", 2008). Al agregar fibras al concreto se incrementa en forma importante la tenacidad del material; es decir, el concreto reforzado con fibras es capaz de soportar cargas bajo flexión o deformaciones mucho mayores que aquellas a las cuales aparece el primer agrietamiento en la matriz (Roy Montufar Nuñez, 2006).

Muchas fibras fueron y están siendo continuamente introducidas en el mercado como nuevas aplicaciones, como por ejemplo:

- Fibras de acero
- Fibras de vidrio
- Fibras de carbón
- Fibras orgánicas y minerales
- Fibras de polipropileno
- Otras fibras sintéticas (como kevlar, nylon y polyester).

En esta investigación se usarán fibras de polipropileno, la forma en que funcionan estas fibras es de refuerzo secundario para ayudar a reducir la retracción.

El uso de estas fibras no requiere de equipos especiales, lo que si se necesita es una cuidadosa dosificación para determinar el asentamiento de cono para así tener la docilidad necesaria en un hormigón autocompactante, por lo que son 2 cosas que se deben definir :

- % de fibra de polipropileno a adicionar a la mezcla.
- Longitud de fibra de polipropileno a utilizar.

Estas fibras son fabricadas en pequeños paquetes que tienen la impresión de un manojo de paja. Durante la operación de mezclado, el movimiento en conjunto corta esos manojos dejándolos en manojos más pequeños y fibras individuales.

En el hormigón las fibras actúan mejorando la resistencia a tracción de este y mientras más largas son las fibras, mayor es la adherencia entre fibra y pasta por lo que mejora la resistencia a tracción. Sin embargo si estas fibras son muy largas, la uniformidad de su distribución se dificulta.

Para lograr un equilibrio óptimo las empresas han fabricado las fibras en distintos tamaños y longitudes, las de mayor longitud pueden emplearse cuando los áridos son de mayor tamaño, así mismo las de menor longitud son aplicadas a áridos pequeños o livianos.

Las fibras de polipropileno tienden a hacer la mezcla más cohesiva, esto hace disminuir el asentamiento de los áridos gruesos, y de esa manera reduce la cuantía de exudación. Una menor cuantía de exudación significa una menor cuantía de secado y por eso una menor retracción plástica.

El concreto reforzado se contrae menos que el concreto simple, la diferencia relativa es función del porcentaje de refuerzo, es por esto que los ensayos realizados por R. Zollo (1997) determinaron que las fibras de polipropileno reducen la retracción del hormigón simple en aproximadamente 75%.

En el hormigón endurecido las fibras de polipropileno actúan como reductoras de agrietamiento. Como cualquier refuerzo secundario, las fibras tienden a evitar la propagación de grietas debido a la cohesión que logran, estas forman un refuerzo tridimensional que distribuye los esfuerzos de tracción a través del hormigón, mejora la resistencia al impacto además de la resistencia a flexión, todas estas son mejoradas en aproximadamente un 10%.

En esta investigación se ocupará fibras Cave.

El problema de este material se produce en la docilidad ya que se reduce al emplear fibras de distintos tipos e incluso las Cave, pero tiene ventajas y una de estas es que no absorbe agua de amasado, esta fibra sintética de multifilamento de polipropileno virgen tiene un largo de 12 mm y resistente a los álcalis. Otra de las ventajas de este material es que se distribuye en la masa de hormigón o mortero formando una red tridimensional altamente uniforme.

#### **2.5.2.5 Condiciones ambientales.**

La humedad relativa ambiente afecta mucho la magnitud de retracción del hormigón, ya que a una menor humedad relativa la mezcla cede más agua al medio ambiente, por lo tanto el hormigón colocado en aire seco (no saturado) se retrae, pero si estuviese en agua o en aire con humedad relativa del 100% se expande.

Otro punto es la temperatura ambiente que controla la humedad relativa del ambiente de exposición y la velocidad de hidratación del hormigón, aunque la temperatura por sí misma, solo afecta la velocidad de desarrollo pero no altera la retracción última, la que depende principalmente de la humedad relativa presente en el tiempo de exposición considerado (Solas y Giani, 2010).

El factor viento, sobretodo en caso de hormigonado en tiempo caluroso y seco puede afectar la velocidad de evaporación del agua presente en los poros superficiales y por lo tanto incrementar el desarrollo de la retracción en el tiempo.

La magnitud de la retracción es en gran parte independiente de la velocidad del secado, salvo los casos en que se transfiere un hormigón sumergido en agua a un ambiente de muy poca humedad, donde puede producirse la fractura (Munizaga, 2009).

#### **2.5.2.6 Geometría del elemento**

A una humedad relativa de almacenamiento constante, tanto el tamaño como la forma de un elemento de hormigón determinan la magnitud de la retracción por secado (Munizaga, 2009). La forma y dimensiones del elemento determinan la distancia que la humedad debe recorrer para alcanzar la superficie de secado, razón por la que los elementos más gruesos se retraen más lentamente.

Las armaduras de refuerzo normalmente restringen la deformación por retracción hidráulica, desde ese punto de vista considerando que la retracción se produce desde las superficies expuestas hacia el interior de la masa de un elemento de hormigón, la ubicación de armaduras cercanas a la superficie, armaduras de piel, resultan trascendente para el control de la fisuración. Por otra parte como la relación superficie de adherencia/sección de acero, aumenta a medida que se utilizan barras de menor diámetro, es siempre recomendable usar un gran número de barras pequeñas que un número menor de barras gruesas (Solas y Giani, 2010).

### 2.5.3 Retracción hidráulica en Hormigón autocompactante

El Hormigón Autocompactante a pesar que se fabrica con los mismos componentes que el hormigón convencional tiene una gran diferencia en la composición final de la mezcla. La diferencia del HAC con respecto al hormigón convencional es que el tamaño máximo nominal es menor y además tiene mayor contenido de superplastificante. Las modificaciones en la composición de la mezcla también pueden influir sobre el comportamiento del hormigón en su estado endurecido, incluyendo la retracción (G. Agranati, J. Fernández).

Debido a que el hormigón autocompactante tiene un mayor volumen de pasta respecto al hormigón convencional, la retracción plástica es ligeramente superior en el primero. En cambio, la retracción por secado es inferior en el hormigón autocompactante respecto al convencional (Bermejo E. 2009).

En el caso del hormigón autocompactante, la relación de agua/finos y el contenido de árido influyen de forma opuesta sobre la retracción. Al reducir el contenido de árido, la retracción debe de aumentar y, por el otro lado, la elevada relación agua/finos de la mezcla contribuye a una disminución de la misma (Agranati, 2008).

Los modelos de cálculo de retracción existentes se pueden aplicar en los hormigones autocompactantes debido a que no se aprecian diferencias destacables en el cálculo de la retracción entre los hormigones autocompactantes y los convencionales como se reflejan en diversas investigaciones, pero hay que tener en cuenta que sí que existen diferencias de precisión entre los diferentes modelos de cálculo (Estudio de modelos de cálculo de retracción, Agranatti y fernandez, 2008).

Existen investigaciones relacionadas con la retracción en el hormigón autocompactante y gracias a esto se genera un buen debate bibliográfico, dentro de todas destacan las siguientes:

- ◇ Chan et al. (2000) estudió la retracción del hormigón autocompactante expuesto a diferentes condiciones ambientales y determinaron que la retracción es mayor en el hormigón autocompactante con respecto al convencional en condiciones ambientales similares.
- ◇ Turcry et al (2002) sobre las propiedades mecánicas y las deformaciones del HAC, se detectó que la retracción plástica del HAC es hasta 4 veces mayor que la del HC, con valores de 1250 y 270  $\mu\text{m}/\text{m}$ , respectivamente. Turcry opina que esto se debe a la baja relación agua/polvos y el retraso en el fraguado del HAC, debido al alto contenido de superplastificante.
- ◇ Según Hammer et al. (2001) la distribución del tamaño del árido influye significativamente en la retracción del hormigón.
- ◇ Brunner (2003) analizó el efecto del contenido de aire. Se comparó la retracción de mezclas con relación agua/cemento de 0,45 , 0,55 , 0,65 sin aireantes, con mezclas de dosificación similar pero con 7% y 12% de aire. Los resultados indican que el contenido de aire no influye sobre la retracción del HAC.
- ◇ Song et al. (2001) investigaron la influencia de la finura de la escoria como adición y llegaron a la conclusión que la finura de la escoria influye notablemente sobre la retracción a edades cortas debido a que era mayor cuanto más fina fuese la escoria.

- ◇ See y Attiogbe (2005) concluyó que reducir la relación arena/total aridos no influye sobre la retracción pero reducir el volumen de pasta de 35 a 30% si contribuye a la disminución de la retracción.
- ◇ Chopin et al. (2003) realizaron un estudio de la influencia del volumen de pasta, la relación grava/arena, el contenido de superplastificante y la resistencia a compresión sobre la retracción. Se concluyó que la resistencia a compresión es el factor más determinante, que el volumen de pasta no implica un aumento de la retracción, y que el tipo de adición puede influir sobre la retracción autógena.
- ◇ Assié et al. (2003) concluyeron que la retracción era ligeramente superior en el hormigón autocompactante respecto al hormigón convencional.
- ◇ Viera et al. (2003) realizaron un estudio con hormigones de resistencia a compresión aproximadamente de 45 MPa utilizando ceniza volante y caliza como adiciones. Determinaron que el comportamiento de ambos tipos de hormigones era similar frente a retracción.
- ◇ Poppe et al. (2005) estudiaron el efecto del contenido de filler calizo sobre seis mezclas de hormigón autocompactante. Obtuvieron que la retracción no sólo dependía de la relación agua/cemento, sino también de la relación agua/finos.
- ◇ Leemann et al. (2005) realizaron un estudio con nueve tipos de hormigones autocompactantes con adición de ceniza volante y cuatro tipos de hormigones convencionales. Determinaron que la retracción en el hormigón autocompactante era un 30% mayor respecto al convencional y este aumento lo relacionaron con el aumento del volumen de pasta.
- ◇ Persson (2005) determinó que, debido al menor contenido de árido grueso en el hormigón autocompactante, la retracción era aproximadamente un 20% mayor que en el convencional.
- ◇ Seng et al. (2005) estudiaron la retracción en diversas mezclas de hormigón autocompactante pero con diferente contenido de filler calizo en piezas pretensadas y concluyeron que el contenido de filler no influía en la retracción del hormigón.
- ◇ Novilla (1996) dice que los aditivos plastificantes, en igualdad de dosis de cemento y agua, tienen un efecto insignificante en la retracción hidráulica y su influencia real en la retracción se debe a las variaciones del contenido de agua o de cemento que su uso permite.
- ◇ Varela y Aguilar (1999) dicen que la incorporación al hormigón de algunos tipos de aditivos plastificantes de alto efecto y/o superplastificantes, permiten reducir ligeramente la retracción hidráulica a igualdad de consistencia del hormigón resultante.

Es por las variadas conclusiones expuestas anteriormente que sería muy interesante el desarrollo de este trabajo investigativo, para llegar a nuestras propias conclusiones utilizando variables definidas y en el mejor de los casos responder a la hipótesis expuesta en este informe.

Son muchas las variables que influyen en la retracción, y pueden ser separadas en dos grupos: en lo relacionado a la composición de la mezcla y directamente al tipo de agregado y en lo relacionado a la dosificación. Las variables más influyentes en relación a la composición de la mezcla son el volumen de pasta y el tipo de agregado. Y en cuanto a la dosificación tenemos la relación agua/cemento (Manuel Gruñon, 2004).

## 3. Diseño experimental

### 3.1.- Generalidades

En este capítulo se explica el diseño experimental desarrollado para el estudio de la influencia que tienen distintos agregados y adiciones en la retracción hidráulica de un hormigón autocompactante.

El objetivo del diseño experimental es evaluar la escoria de cobre como reemplazo del árido grueso en el HAC, en otras probetas se realiza un reemplazo del árido fino por vidrio reciclado y también por separado se realizan probetas con adición de fibras de polipropileno en diferentes dosificaciones.

Este diseño de experiencia mantiene parámetros constantes como cemento, agua, y tipo de aditivo fluidificante, así es posible determinar la influencia de los tipos de agregados y adiciones.

El estudio se divide en tres etapas. En primer lugar se identifican las variables independientes (factores) y las variables dependientes, dando una descripción de cada una de ellas.

Luego se realiza el diseño factorial, el cual va a entregar la cantidad de muestras que se deben realizar y el número de réplicas requeridas para realizar los ensayos de retracción libre y resistencia a la compresión.

Finalmente se presentan los equipos que se utilizan y los ensayos que se realizan en el laboratorio para la confección de las probetas de hormigones autocompactantes.

También se presentan las condiciones y métodos de ensayos que se realizan al hormigón autocompactante, para estudiar la retracción hidráulica también llamada retracción por secado en hormigones, cabe señalar que estos se fabricaron con cemento portland puzolánico, grado corriente, nacionales.

Las dimensiones de las probetas para retracción libre son de 75 x 75 x 285 mm y de 150 x 150 x 150 mm para resistencia a la compresión.

Las mediciones de retracción libre se realizan a los 4, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 90 días, las probetas son ensayadas inmediatamente después de su curado donde deben permanecer en una cámara húmeda según Nch 1017 Of 75. La resistencia a compresión se mide a los 28 días.

## 3.2.- Definición de los parámetros

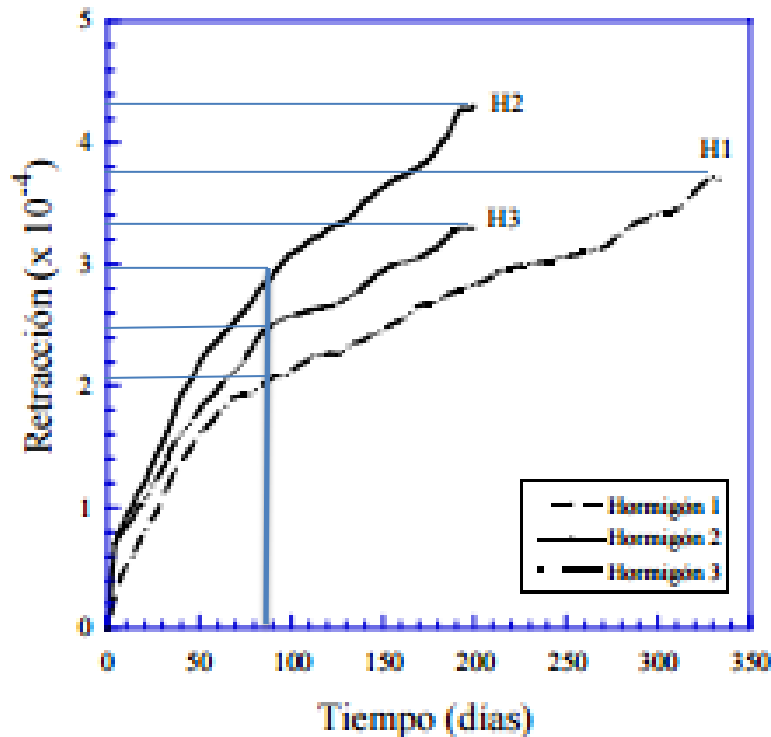
### 3.2.1.- Variables Independientes

Se toman variables independientes las cuales son: el % de reemplazo de árido tanto grueso como fino, en este caso será 20% y 60%. Y en el porcentaje de incorporación de fibra de polipropileno será de 600 gr/m<sup>3</sup> y 900 gr/m<sup>3</sup>.

Para determinar el porcentaje de reemplazo de escoria como árido grueso se toma como referencia la investigación realizada por Sergio Pérez Chavez (2004) "Hormigón pesado a base de trozos de acero" de la Universidad Austral en la cual se concluye que con el reemplazo de un 40% de un árido de mayor densidad el hormigón mejora sus propiedades. Y para el caso para el reemplazo del vidrio reciclado como árido fino la referencia la tesis de Ronald Álvarez Allende.

Para determinar la cantidad de días que se va a realizar el ensayo de retracción hidráulica en esta tesis, se tomó como referencia la tesis del autor Bermejo, Ester (2009) "Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación" donde se muestra la retracción de 3 tipos de hormigones (figura 3) indicando la retracción hidráulica durante el tiempo.

**Figura 3: Deformación por retracción en HAC**



Fuente: E.B.Bermejo Núñez "Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación", 2009.

Hormigón autocompactante 1: el hormigón presenta a los 90 días 54% de retracción.  
 Hormigón autocompactante 2: el hormigón presenta a los 90 días 76% de retracción  
 Hormigón autocompactante 3: el hormigón presenta a los 90 días 66% de retracción

A los 90 días estos 3 hormigones autocompactantes presentan una retracción hidráulica que se encuentra entre un 54 – 76 % entre los tres generan un promedio de 65% de retracción que es aproximadamente el porcentaje de retracción que se medirá en esta tesis.

A continuación se presenta una tabla y grafico de hormigones convencionales donde se mide la retracción hidráulica hasta los 448 días, donde se estima cuanto es la retracción a los 90 días. Esta investigación fue realizada por Carlos Videla, Juan P. Covarrubias y Cristian Masana “Calibración de modelos de predicción de la retracción hidráulica a hormigones fabricados con cementos chilenos”

En la tabla N<sup>a</sup> 6 y figura N<sup>a</sup> 4 que vienen a continuación se presentan 3 hormigones que fueron tomados para determinar cuánto es aproximadamente la retracción a los 90 días de edad.

**Tabla 6: Retracción hidráulica de 3 hormigones convencionales**

Días	Retracción (mm/m)	
	90	448
Hormigón 1 (PP-40/6-1)	0,6750	0,7907
Hormigón 2 (P-40/12-1)	0,6445	0,7800
Hormigón 3 (PP-40/12-1)	0,8697	0,9860

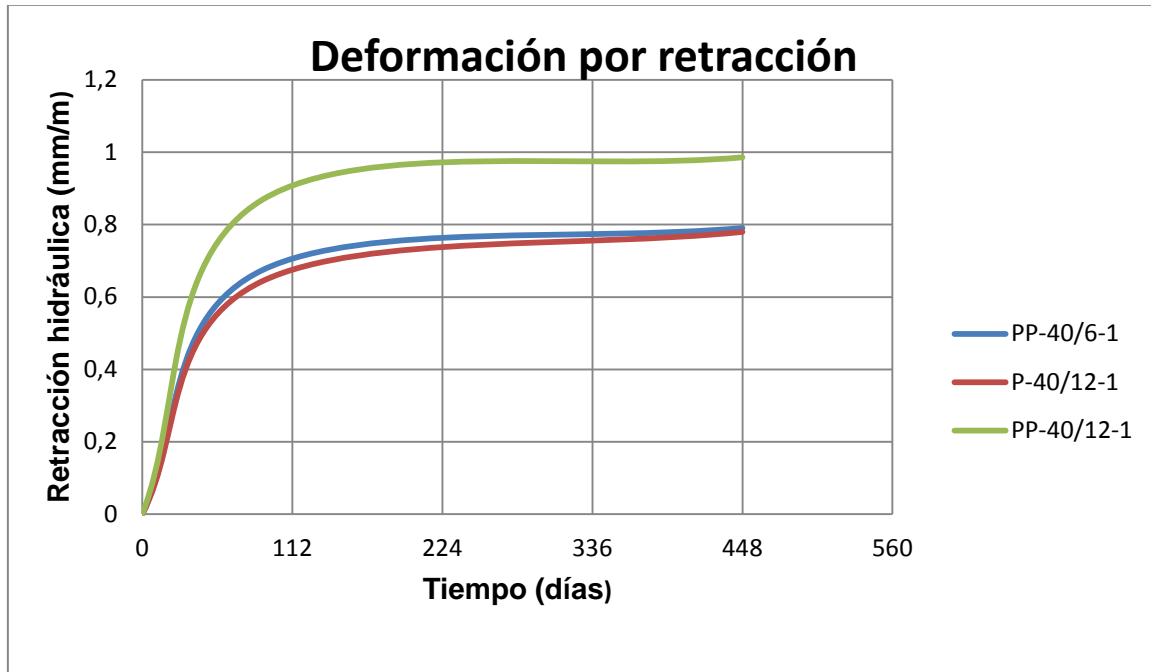
Fuente: Revista Ingeniería de Construcción Volumen 16 N° 4, enero junio de 2001.

**Tabla 7: Porcentaje en relación a la retracción alcanzada a los 90 y los 448 días.**

Tipo Hormigones	PP-40/6-1	PP-40/12-1	PP-40/12-1
Lectura 90 días (mm/m)	0,6750	0,6445	0,8697
Lectura 448 días (mm/m)	0,7907	0,7800	0,9860
% Retracción	85,4	82,6	88,2

Fuente Elaboración Propia.

Figura 4: Deformación por retracción en hormigones convencionales



Fuente: Revista Ingeniería de Construcción Volumen 16 N° 4, enero junio de 2001.

Hormigón 1 (PP- 40/6-1): presenta a los 90 días 85,4% de retracción  
 Hormigón 2 (P- 40/12-1): presenta a los 90 días 82,6% de retracción  
 Hormigón 3 (PP- 40/12-1): presenta a los 90 días 88,2% de retracción

El gráfico anterior presenta la retracción hidráulica medida en 3 hormigones a la edad de 448 días donde no se presenta una diferencia muy notoria en la retracción hidráulica a los 90 días que se encuentra entre un 82-88%.

Para esta tesis se tomará como referencia la tesis de Ester B. Bermejo Núñez por estar trabajando con hormigones autocompactantes, es por esto que a los 90 días de ensayo se logrará medir aproximadamente hasta un 65% de la retracción hidráulica final.

Las 3 variables independientes utilizadas son:

- A) **Contenido de Escoria de cobre:** En esta investigación se utilizó escoria en reemplazo del árido grueso en porcentajes del 20 y 60%. Para así con esto poder identificar y determinar la influencia del este material.
- B) **Contenido de Vidrio Reciclado:** En esta investigación también se utilizó vidrio molido, el cual se ocupó en reemplazo de árido fino, y de esa forma se incorporó en dosis de 20 y 60%.

- C) Adición de Fibra de Polipropileno:** En la investigación se utilizó fibras de polipropileno, Cave. Cuyo fabricante recomendó la dosis de 600 gr/m<sup>3</sup> y a partir de esto se decidió realizar un incremento del 50% más quedando así la otra dosificación de 900 gr/m<sup>3</sup>. Con esto se asume que serán 2 las dosis a adicionar en las amasadas. Así logrando ver cuánto influye en la retracción hidráulica del hormigón autocompactante.
- D) Tiempo:** las mediciones de retracción libre se hicieron a los 4, 7, 14, 21, 28, 35, 49, 56, 63, 90 días. Se realizará hasta los 90 días ya que es el tiempo mínimo de días requeridos para tener estimaciones dentro del límite de exactitud normalmente aceptada.

### **3.2.2.- Variables dependientes**

Los ensayos de retracción libre, resistencia a la compresión son los parámetros de medición que van a responder lo que se busca en esta investigación.

#### **a) Retracción libre**

Ensayo que se realizará siguiendo la norma chilena NCh 2221 Of 94 que determina la variación de longitud de una probeta prismática de hormigón en un tiempo determinado producto de la retracción hidráulica. Este tiempo de medición es de 4, 7, 14, 21, 28, 35, 49, 90 días de secado con 7 días de curado previos, lo que da un total de 97 días de edad.

#### **b) Resistencia a la compresión**

Ensayo que va a determinar la resistencia de las probetas ante un esfuerzo de compresión que se realizará según la norma chilena NCh 1037 Of 2009 se va a efectuar a los 28 días.

### 3.3.- Factorial experimental

Una vez fijados los parámetros independientes, se definió la factorial experimental de la investigación, en donde se determinó la fabricación de los hormigones autocompactantes con distintas dosis y tamaño de reemplazo. Estos hormigones serán sometidos a distintos ensayos, que van a ser descritos más adelante.

Se consideran como variables categóricas las siguientes:

- **Tamaños de reemplazo**

TRE (Tamaño Reemplazo Escoria): 5 mm – 20 mm.

TRV (Tamaño Reemplazo Vidrio): 0,16 mm – 5 mm.

TAF (Tamaño Adición de Fibras): 12 mm

- **Cantidad % Reemplazo y adición**

CE.1: 20%            CE.2: 60%

CV.1: 20%            CV.2: 60%

CF.1: 600 gr/m<sup>3</sup>    CF.2: 900 gr/m<sup>3</sup>

- **Días de ensayo de retracción libre:** 4, 7, 14, 21, 28, 35, 49, 90 días.

Se realiza el ensayo de retracción libre durante 90 días, con 2 porcentajes distintos de Escoria (CE1, CE2) y 1 tamaño TRE. También con 2 porcentajes distintos de Vidrio (CV1, CV2) y 1 tamaño TRV, y además 2 porcentajes distintos de Fibras (CF1, CF2) y 1 tamaño TAF lo que da un total de 6 tratamientos de hormigón autocompactante más el hormigón patrón. En la tabla 7 se va a determinar la cantidad de probetas que se van a realizar en los ensayos de retracción libre (X), resistencia a la compresión (Y) que se va a ensayar el día 28.

Tabla 8: Factorial Experimental

Mezcla	0%		600 gr/m <sup>3</sup>		900 gr/m <sup>3</sup>		20%		60%		Total Muestras
	Ret.	Comp.	Ret.	Comp.	Ret.	Comp.	Ret.	Comp.	Ret.	Comp.	
HAC patron	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	6
HAC escoria	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	12
HAC vidrio	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	12
HAC fibra	-	-	3	3	3	3	-	-	-	-	12
<b>Total de probetas</b>										<b>42</b>	
<b>Numero Amasadas</b>										<b>7</b>	

Fuente : Elaboración Propia.

Ret: Probetas ensayadas a retracción.

Comp: Probetas ensayadas a compresión.

### 3.4.- Materias primas utilizadas

#### A) Cemento

El cemento a utilizar en esta investigación corresponde a cemento portland puzolánico grado corriente según norma NCh 148 Of 68 "Cemento - terminología, clasificación y especificaciones generales", fabricado en una planta cementera nacional.

- Cemento portland puzolánico de grado corriente, Melón especial.

#### B) Agua

El agua a utilizar será del tipo potable que cumpla con todos los requisitos de la norma chilena NCh 1498 Of 82 "Hormigón – agua de amasado - requisitos"

#### C) Áridos

Se utiliza la combinación de dos tipos de áridos conformados por: un árido grueso de tamaño máximo nominal de 20 mm y arena procedentes del río Aconcagua. La caracterización de los áridos y su granulometría se producen según la norma chilena NCh 165 Of 2009 "áridos para morteros y hormigones – requisitos generales".

#### D) Escoria de cobre

Se utiliza como agregado grueso. El árido proveniente del depósito de la fundición de Codelco Ventanas. La escoria será tamizada con un tamaño máximo nominal será de 20 mm

#### E) Fibras Polipropileno

El tipo de fibra a utilizar será de Polipropileno Cave P-12, la longitud es de 12 mm. Su dosificación será de  $0,600 \text{ kg/ m}^3$  (según fuentes consultadas, Tesis Francisco Córdova, Universidad de Valparaíso, Chile 2013)

#### F) Vidrio

Se utiliza como árido fino por lo que su tamaño máximo nominal será de 5 mm. El vidrio será recolectado de reciclaje y tamizado.

- G) Aditivo:** El aditivo Fluidificante que se va a utilizar se denomina Sika Viscocrete 5100 CL. y los detalles técnicos de este aditivo se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9: Especificaciones técnicas del aditivo**

<b>Información técnica de Sika Viscocrete 5100 CL</b>	
Apariencia	Líquido
Color	Ambar de transparente a opaco
Densidad	1,08 kg/dm <sup>3</sup>
Método de aplicación	0,3 a 1,5% del peso del cemento

Fuente: elaboración propia

## 3.5 Propiedades de los áridos

### 3.5.1.- Densidades de los áridos

Los áridos que se utilizaron en esta investigación son gravilla, arena, filler, vidrio y escoria de cobre. Los ensayos de densidad aparente, densidad real y absorción de árido grueso y árido fino fueron realizados conforme a lo establecido en las normas NCh1116.Of77, NCh1117.Of77 y NCh1239.Of77, respectivamente.

#### 3.5.1.2.- Áridos gruesos

##### a) Densidad Grava 20 mm.

La densidad aparente de la Grava de 20 mm. se determina según lo establecido en la NCh 1116 Of. 77. "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente". Para la densidad real y neta se recurrió a la NCh 1117 Of. 77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas.

La tabla 10 y 11 muestran la densidad aparente suelta y compactada obtenida en tres muestras diferentes de grava de 20 mm.

**Tabla 10: Densidad aparente suelta grava 20 mm.**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Peso recipiente	3,696	3,696	3,696
Volumen recipiente (lt)	5,173	5,173	5,173
Recipiente + muestra (Kg)	11,440	11,631	11,654
Promedio Das (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1523</b>		

Fuente: elaboración propia

**Tabla 11: Densidad aparente compactada, grava de 20 mm.**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Peso recipiente	3,696	3,696	3,696
Volumen recipiente (lt)	5,173	5,173	5,173
Recipiente + muestra (Kg)	12,127	12,223	12,202
Promedio Dac (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1640</b>		

Fuente: elaboración propia

La tabla 12: Muestra la densidad real y neta de la grava de 20 mm. y su porcentaje de absorción.

**Tabla 12: Densidades reales y absorción de grava de 20 mm.**

Tipo de árido	Densidad real sss (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad real seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Neta (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorción %
Grava 20 mm.	2648	2617	2700	1,18

Fuente: elaboración propia

**b) Escoria de cobre**

La densidad aparente de la escoria de 20 mm. se determina según lo establecido en la NCh 1116 Of. 77. "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente". Para la densidad real y neta se recurrió a la NCh 1117 Of. 77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas.

La tabla 13 y 14 muestran la densidad aparente suelta y compactada obtenida en tres muestras diferentes de escoria de 20 mm.

**Tabla 13: Densidad aparente suelta escoria 20 mm.**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Peso recipiente	3,685	3,685	3,685
Volumen recipiente (lt)	5,173	5,173	5,173
Recipiente + muestra (Kg)	14,616	14,477	14,541
Promedio Das (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>2099</b>		

Fuente: elaboración propia

**Tabla 14: Densidad aparente compactada escoria de 20 mm.**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Peso recipiente	3,685	3,685	3,685
Volumen recipiente (lt)	5,173	5,173	5,173
Recipiente + muestra (Kg)	15,541	15,501	15,451
Promedio Dac (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>2283</b>		

Fuente: elaboración propia

La tabla 15: Muestra la densidad real y neta de la grava de 20 mm. y su porcentaje de absorción.

**Tabla 15: Densidades reales y absorción de Escoria de 20 mm.**

Tipo de árido	Densidad real sss (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad real seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Neta (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorción %
Escoria 20 mm.	3817	3813	3834	0,16

Fuente: elaboración propia

### 3.5.1.3.- Áridos finos

#### a) Densidad arena

La densidad aparente se determina según lo establecido en la NCh 1116 Of. 77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente". Para obtener la densidad real y neta se recurrió a la NCh 1239 Of. 77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de las arenas".

La tabla 16 y 17 muestran la densidad aparente suelta y compactada obtenida en tres muestras diferentes de arena.

**Tabla 16: Densidad aparente suelta de la arena.**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Volumen recipiente (lt)	1003	1003	1003
Muestra (Kg)	1,693	1,736	1,714
Promedio Das (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1665</b>		

Fuente: elaboración propia

**Tabla 17: Densidad aparente compactada de la arena**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	1003	1003	1003
Muestra (Kg)	1,803	1,814	1,810
Promedio Dac (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1783</b>		

Fuente: elaboración propia

La tabla 18 muestra la densidad real y neta de la arena y su absorción (%) según lo fijado por la Nch 1239 Of. 77.

**Tabla 18: Densidades reales y absorción de la arena**

Tipo de Árido	Densidad real sss (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad real seco (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Neta (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorción
				%
Arena	2676	2670	2750	1,01%

Fuente: elaboración propia

**b) Densidad vidrio molido**

La densidad aparente del vidrio se determina según lo establecido en la NCh 1116 Of. 77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente". Para obtener la densidad real y neta se recurrió a la NCh 1239 Of. 77 "Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta de las arenas".

La tabla 19 y 20 muestran la densidad aparente suelta y compactada obtenida en tres muestras diferentes de arena.

**Tabla 19: Densidad aparente suelta del vidrio**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Volumen recipiente (lt)	1003	1003	1003
Muestra (Kg)	1,561	1,573	1,566
Promedio Das (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1567</b>		

Fuente: elaboración propia

**Tabla 20: Densidad aparente compactada del vidrio**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	1003	1003	1003
Muestra (Kg)	1,803	1,814	1,810
Promedio Dac (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1809</b>		

Fuente: elaboración propia

La tabla 21 muestra la densidad real y neta del vidrio y su absorción (%) según lo fijado por la Nch 1239 Of. 77.

**Tabla 21: Densidades reales y absorción del vidrio**

Tipo de Arido	Densidad real sss (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad real seco (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Neta (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorción
				%
Vidrio molido	2512	2511	2513	0,032

Fuente: elaboración propia

### c) Densidad del filler

La densidad aparente del filler se determina al igual que la arena según lo establecido en la NCh 1116 Of. 77. Para obtener la densidad real y neta se recurrió a la NCh 1239 Of. 77.

Las tablas 22 y 23 muestran la densidad aparente suelta y compactada obtenida en tres muestras diferentes de filler.

**Tabla 22: Densidad aparente suelta filler**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Volumen recipiente (lt)	1003	1003	1003
Muestra (Kg)	1,343	1,334	1,342
Promedio Das (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1336</b>		

Fuente: elaboración propia

**Tabla 23: Densidad aparente compactada filler**

Muestras	Masa en Kg.		
	1	2	3
Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	1003	1003	1003
Muestra (Kg)	1,450	1,465	1,459
Promedio Dac (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1454</b>		

Fuente: elaboración propia

La tabla 24 muestra la densidad real y neta del filler y su absorción (%) según lo fijado por la Nch 1239 Of. 77.

**Tabla 24: Densidades reales y absorción del filler**

Tipo de árido	Densidad real sss (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad real seca (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Neta (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorción %
Filler	2632	2584	2713	1,83

Fuente: elaboración propia

### 3.5.2.- Granulometría

Primero se mostrará la granulometría de cada árido a emplear en el laboratorio.

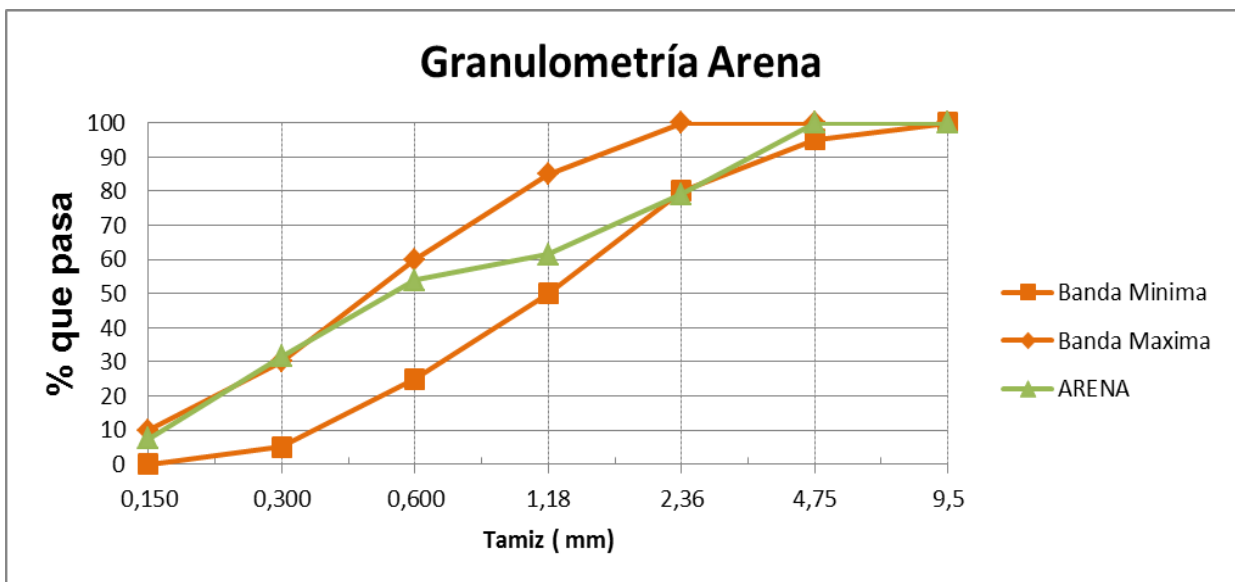
#### a) Granulometría Arena:

Tabla 25: Porcentaje que pasa acumulado de la arena.

Tamaño Tamiz (mm)	Granulometrías			% que pasa		NCh 163 of 2009	
	Muestra	1	2	3	PROMEDIO	Banda Minima	Banda Maxima
	Peso Total	906,1	842,8	889,5	879		
9,5		100	100	100	100	100	100
4,75		100	100	100	100	95	100
2,36		81	79	78	79	80	100
1,18		63	61	61	61	50	85
0,600		55	53	54	54	25	60
0,300		31	33	30	31	5	30
0,150		9	8	6	7	0	10

Fuente : Elaboración Propia

Figura 5: Curva Granulométrica de la Arena.



Fuente: Elaboración Propia.

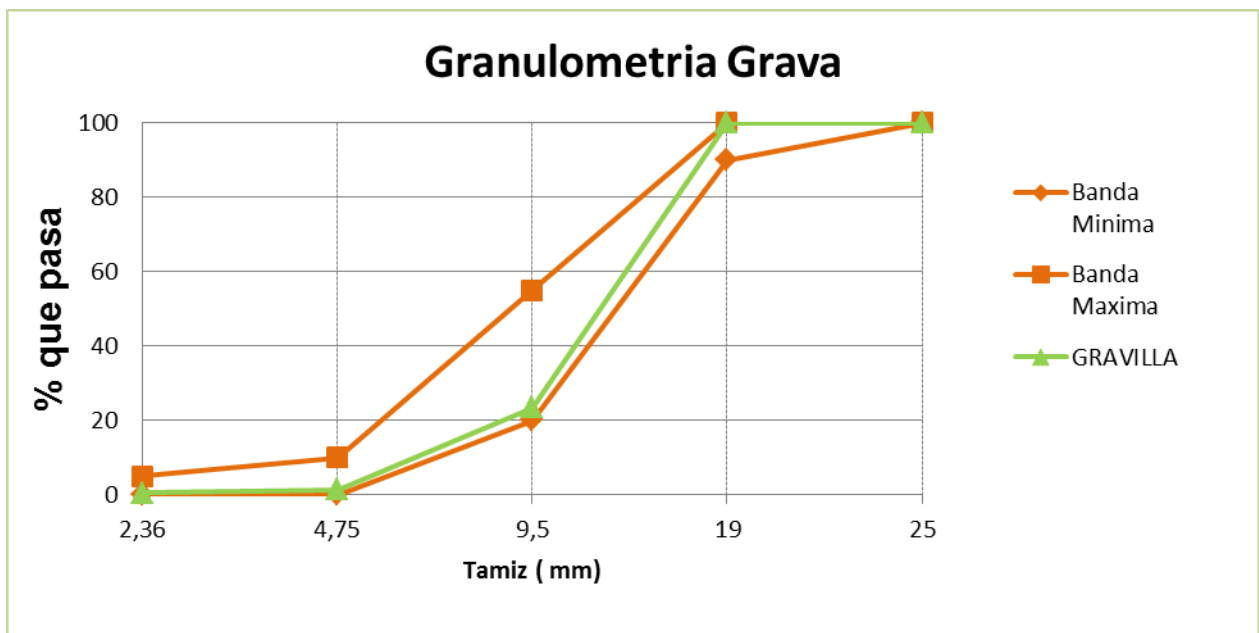
## b) Granulometría Grava

Tabla 26: Porcentaje que pasa acumulado de la grava.

	Granulometrias				% que pasa	NCh 163 of 2013	
	Muestra	1	2	3	PROMEDIO	Banda Minima	Banda Maxima
	Peso Total	8081,4	8627,2	8769,8	8493		
Tamaño Tamiz (mm)	25	100	100	100	100	100	100
	19	100	100	100	100	90	100
	9,5	31	16	23	23	20	55
	4,75	3	1	1	1	0	10
	2,36	0	1	0	0	0	5

Fuente: Elaboración Propia

Figura 6: Curva Granulométrica de la Grava.



Fuente: Elaboración Propia.

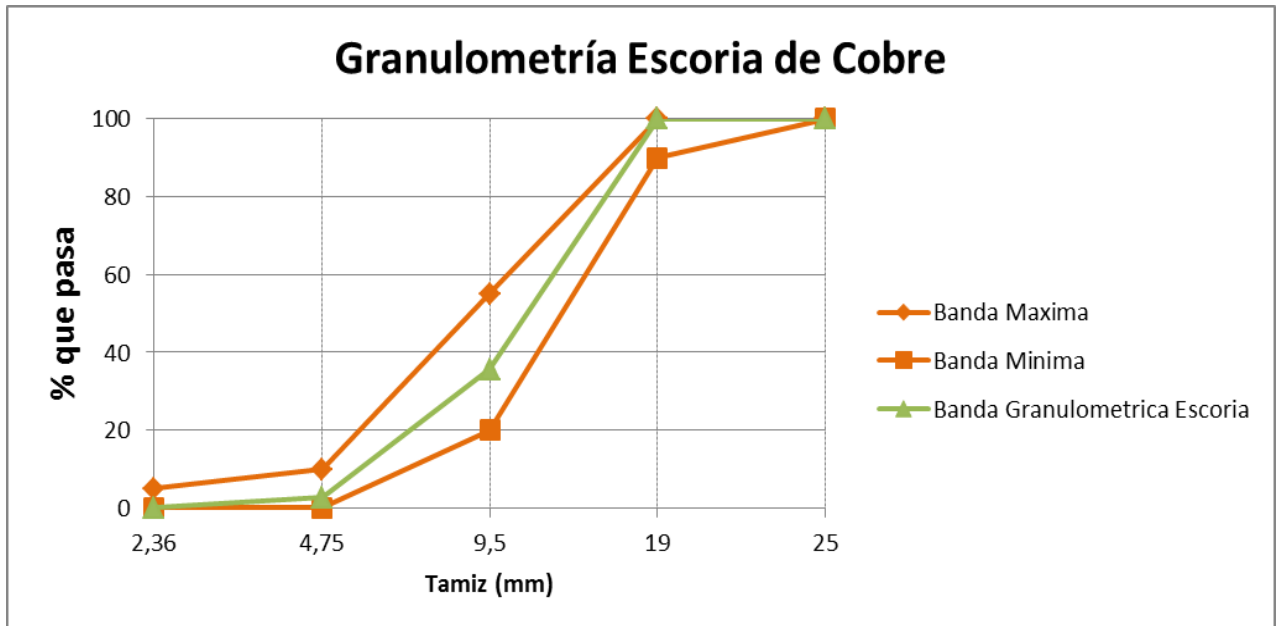
### c) Granulometría Escoria de cobre

Tabla 27: Porcentaje que pasa acumulado de la Escoria de cobre.

Tamaño Tamiz (mm)	Granulometrias				% que pasa	NCh 163 of 2013	
	Muestra	1	2	3	PROMEDIO	Banda Minima	Banda Maxima
	Peso Total	8046,1	8071,9	8027,6	8049		
25		100	100	100	100	100	100
19		100	100	100	100	90	100
9,5		35	36	35	36	20	55
4,75		3	3	3	3	0	10
2,36		0	0	0	0	0	5

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7: Curva Granulométrica de la Escoria de Cobre.



Fuente: Elaboración Propia.

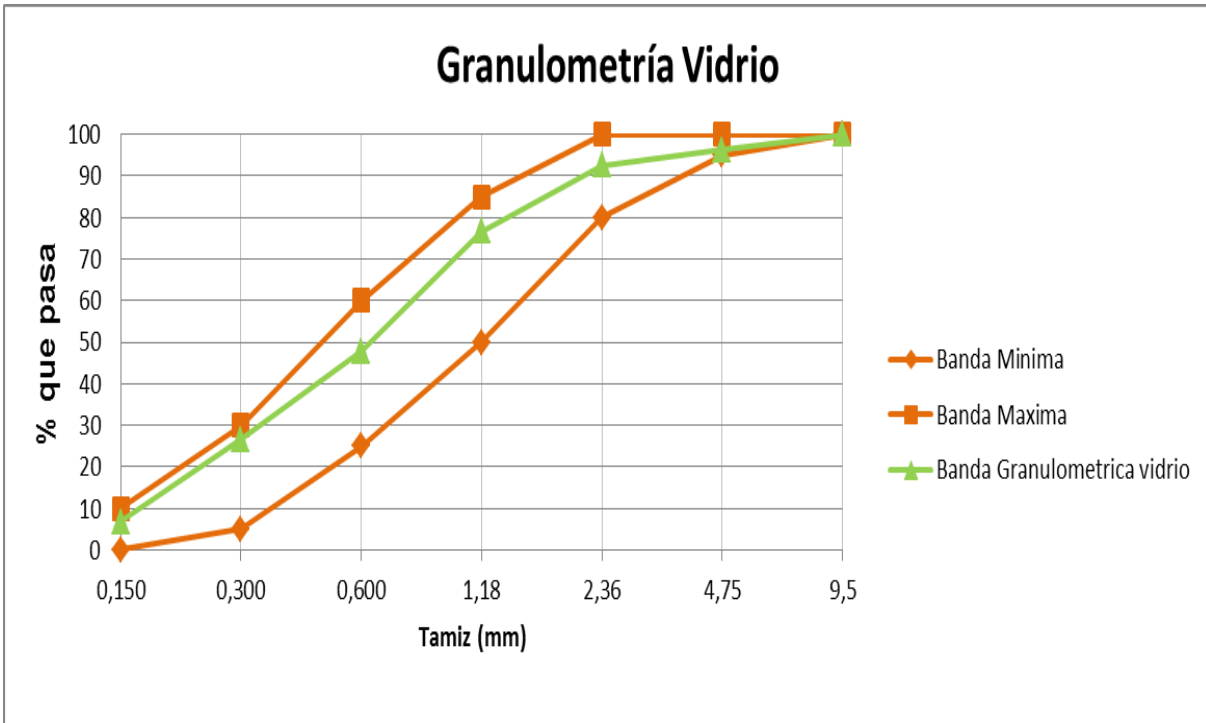
#### d) Granulometría Vidrio reciclado

Tabla 28: Porcentaje que pasa acumulado del Vidrio Molido.

Tamaño Tamiz (mm)	Granulometrias				% que pasa		NCh 163 of 2009	
	Muestra	1	2	3	PROMEDIO	Banda Minima	Banda Maxima	
	Peso Total	500	500	502	501			
9,5		100	100	100	100	100	100	
4,75		96	97	96	96	95	100	
2,36		92	93	92	93	80	100	
1,18		76	77	76	77	50	85	
0,600		48	48	46	48	25	60	
0,300		27	28	24	27	5	30	
0,150		8	7	5	7	0	10	

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 8: Curva Granulométrica del Vidrio Molido.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 29: Árido combinado

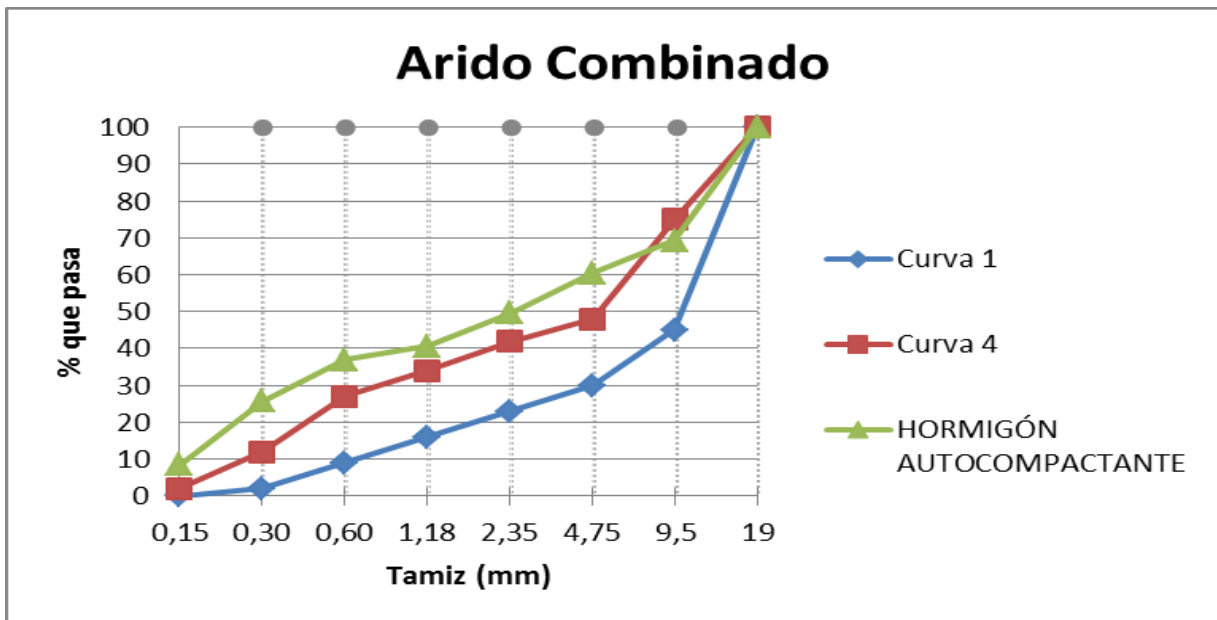
HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE								
Prop. en PESO supuesta	Grueso	Fino	Filler	Árido Combinado				Mezcla tanteo 40-50-10
Tamiz (mm)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa				% pasa
				Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	peso
19	100	100	100	100	100	100	100	100
9,5	23	100	100	45	55	65	75	69
4,75	1	100	100	30	35	42	48	61
2,35	1	79	100	23	28	35	42	50
1,18	0	61	100	16	21	28	34	41
0,60	0	54	100	9	14	21	27	37
0,30	0	31	100	2	3	5	12	26
0,15	0	7	47	0	0	0	2	8
TANTEO	0,4	0,5	0,1					

Fuente: Elaboración Propia

La figura grafica las bandas granulométricas recomendadas por la norma Nch 163 Of 2013 para árido combinado y la granulometría para la dosificación de hormigones autocompactantes

Se utiliza una granulometría de árido combinado con una formación similar a las curvas límites B y C, zona 3 (NCh163.Of79), para así confeccionar mezclas de hormigón lo suficientemente cohesivas por medio de una granulometría de árido principalmente fina. Esta curva se logra mediante la incorporación de los tres áridos antes mencionados, cuya proporción es calculada por el método de tanteo que entregó un 40% de grava, un 50% de arena y un 10% de filler.

Figura 9: Curva Granulométrica del árido combinado



Fuente: elaboración propia

La mezcla que dio mejores resultados en árido combinado es con un reemplazo del 60% de vidrio por la arena, tal cual se muestra en la siguiente tabla y figura.

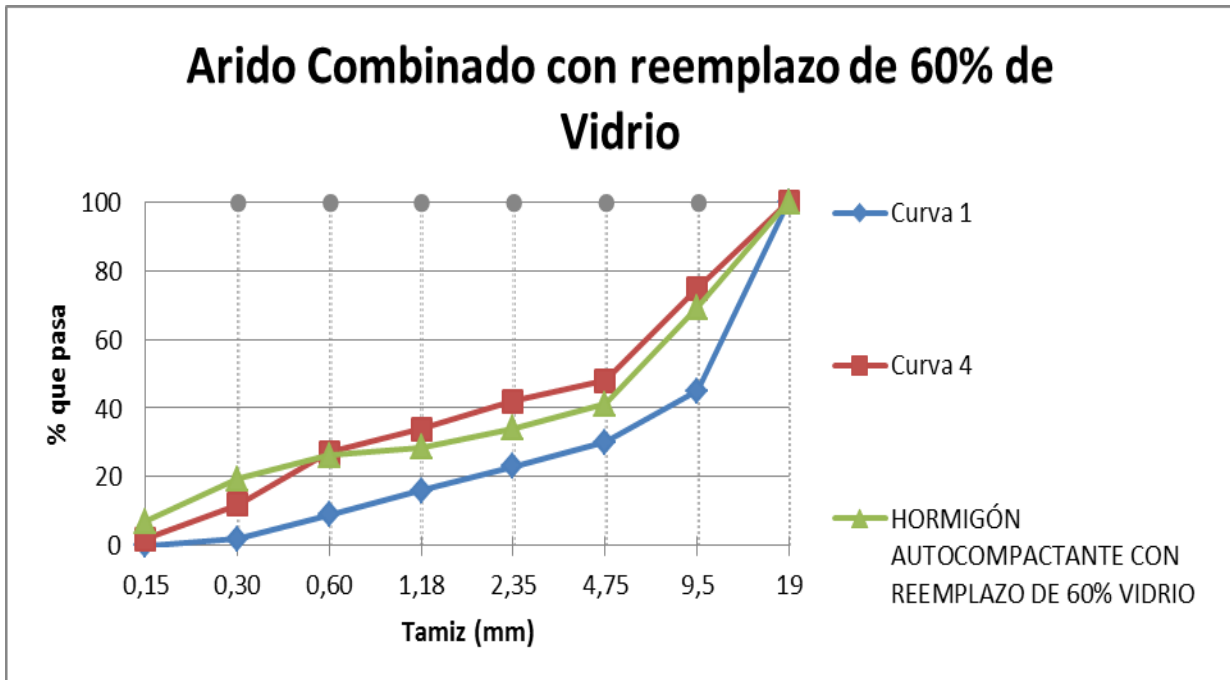
Las mezclas se realizaron para cada distinta dosis de reemplazo y con los distintos áridos por lo que estas se encuentran en el capítulo ANEXOS.

Tabla 30: Árido Combinado con reemplazo de 60% vidrio

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON REEMPLAZO DE 60% VIDRIO									
Prop. en PESO supuesta	Grueso	Fino	Vidrio	Filler	Árido Combinado Banda Granulométrica				Mezcla tanteo 40-20-30-10
Tamiz (mm)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa				% pasa peso
					Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	
19	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9,5	23	100	100	100	45	55	65	75	69
4,75	1	100	35	100	30	35	42	48	41
2,35	1	79	27	100	23	28	35	42	34
1,18	0	61	21	100	16	21	28	34	29
0,60	0	54	18	100	9	14	21	27	26
0,30	0	31	11	100	2	3	5	12	19
0,15	0	7	3	47	0	0	0	2	7
TANTEO	0,4	0,2	0,3	0,1					

Fuente : Elaboración Propia

Figura 10: Curva Granulométrica del árido combinado con reemplazo de 60% de vidrio.



Fuente : Elaboración Propia.

### 3.6.- Aparatos y equipos

Una vez realizada la dosificación de los áridos a utilizar se procede a realizar el ensayo correspondiente de retracción, para los cuales se utilizaron los aparatos y equipos que se detallan a continuación:

#### a) Betonera de eje vertical

La betonera de eje vertical posee una capacidad de 100 litros, la cual es ideal para el llenado de cierta cantidad de moldajes de ensayos de retracción. La adición de los materiales procede una vez pesados en una balanza de precisión y el carguío en la betonera debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma chilena NCh1018.Of77.

Figura 11: Betonera de eje vertical.



Fuente: Elaboración Propia.

#### b) Piscina de curado

La piscina de curado de los laboratorios de docencia de la Universidad de Valparaíso cuenta con el espacio suficiente para proceder a la inmersión de las probetas en agua una vez que se realiza el desmolde de las probetas (1 día después de la realización del hormigón) por un periodo de 28 días para posteriormente someterlas a los ensayos de la presente investigación.

Figura 12: Piscina de curado



Fuente: Elaboración Propia.

### 3.7.- Aparatos y equipos para ensayo de retracción libre

Para la realización del estudio de retracción hidráulica del hormigón se debe cumplir la norma chilena NCh 2221 Of 94 que determina la variación de longitud de una probeta prismática de hormigón en un tiempo determinado, este tiempo de medición es de 4, 7, 14, 21, 28, 35 días de acuerdo a la normativa correspondiente.

#### a) Moldes

Los moldes para probetas de ensayo deben dar prismas de 25 x 25 x 285 mm con una longitud efectiva de medida de 250 mm para probetas de pasta o mortero y de 100 x 100 x 285 mm, longitud efectiva de medida de 250 mm para hormigón con árido de  $D_n \leq 50$  mm, para hormigón con árido de  $D_a \leq 25$  mm se puede usar probetas de 75 x 75 x 285 mm y longitud efectiva de medida de 250 mm.

#### b) Aparato medidor

El aparato medidor consiste en un soporte metálico para apoyar la barra patrón o las probetas, con un dial micrométrico para efectuar lecturas con aproximación a 0,0025 mm

#### c) Barra patrón

La barra patrón es de acero invar u otra aleación, longitud equivalente a la de las probetas de ensayo, con extremos de la misma forma de las piezas de tope que llevan montadas las probetas y un coeficiente de dilatación térmica  $\alpha \leq 0,000002$  /°C, recubierta en su área central en una longitud de 100 mm con goma de 3mm de espesor.

La barra debe disponer cerca de sus extremos de un indicador de posición para poder colocar el instrumento en la misma posición cada vez que se ejecuta una medida de longitud.

## 3.8- Ensayos realizados

### Ensayos de trabajabilidad al Hormigón autocompactante

Los ensayos que permiten determinar la trabajabilidad de las mezclas autocompactantes han variado en relación a la cantidad de experimentación que se ha destinado para tal efecto.

Para medir la trabajabilidad de hormigones convencionales se ha utilizado desde hace ya varios años tanto en terreno como en laboratorio el Cono de Abrams, sin embargo para asentamientos superiores a los 18 cm. dicho equipo deja de ser aplicable. Esta razón ha determinado el uso de algunos equipos alternativos, que difieren unos de otros sólo por los objetivos que se plantean en sus fundamentos de ejecución.

Estos equipos y ensayos describen una condición de aceptación del hormigón, debiendo este material cumplir con ciertos rangos específicos para poder ser considerados y catalogados como hormigón autocompactante.

#### 3.8.1 Caja en L

Una vez se termina de amasar el hormigón, antes de vaciar hormigón se debe cuidar de que la superficie se encuentre nivelada y el elemento totalmente vertical, teniendo todo lo anterior mencionado la caja de la figura es llenada sin compactación hasta que el elemento vertical se encuentre totalmente lleno, de modo que se pueda verificar que no haya segregación en la superficie.

Luego se levanta la compuerta y el flujo de hormigón debe ser continuo, para poder evaluar su autocompactación se debe cronometrar el tiempo que requiere el hormigón para recorrer 40 cm, luego se deberá medir el tiempo transcurrido hasta llegar al final de la caja.

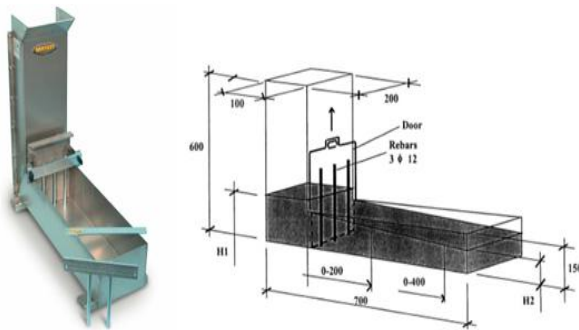
Una vez que se detenga el flujo, se pueden medir las diferencias de nivel del hormigón.

#### **Caja Europea en L**

Fluidez: T 40 cm transcurridos de 3 a 6 segundos.

$H_x \text{ cm}/H_i \text{ cm} > 0.8$

**Figura 13 : Caja en L**



Fuente: Gomes et al., 2002.



Fuente: Elaboración Propia

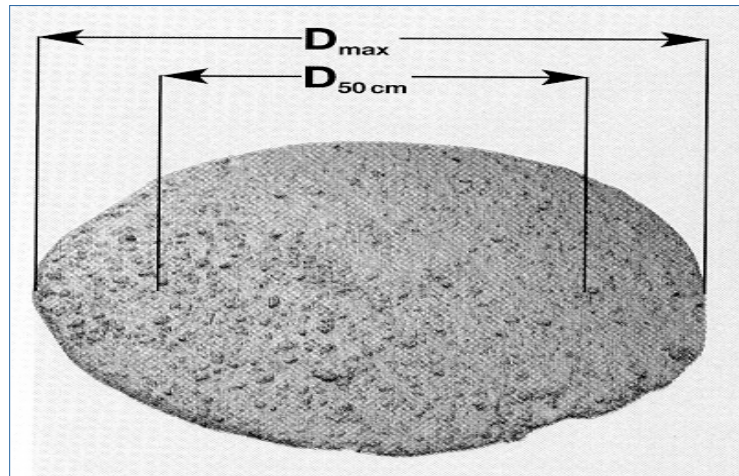
### 3.8.2 Prueba de cono de Abrams invertido.

Para este ensayo se utiliza el mismo cono del ensayo de Cono de Abrams pero en sentido opuesto, es decir con el diámetro más grande como cara de llenado. El hormigón es vaciado sin compactar, hasta que la superficie quede completamente horizontal y el cono completamente lleno.

Luego el cono se levanta cuidadosamente de la superficie dado que el flujo de hormigón podría suspenderse si el cono se levanta muy rápidamente. Se toma el tiempo requerido para que el hormigón alcance un diámetro de 50 cm. y se mide el diámetro máximo alcanzado.

Verificar, especialmente en el borde, la homogeneidad y si hay o no segregación de la mezcla. El Diámetro  $D_{\max}$ . Deberá estar dentro de 55–75 cm., la fluidez deberá ser medida en: Fluidez:  $D_{50}$  cm transcurridos de 3 a 6 seg. Luego verificar la homogeneidad en el borde.

**Figura 14: Esgurrimientos de conos**



**Fuente:** De Schutter et al. "Estudio de la robustez en el hormigón autocompactante con bajo contenido de finos", 2008



**Fuente:** Ing. Nestor Luis Sánchez, 2008. "Trabajabilidad del hormigón en estado fresco".

Como lo muestra la imagen existe una clara diferencia entre los distintos tipos de hormigones en relación a su fluidez.

### 3.9.- Metodología de trabajo

#### 3.9.1 Dosificación del HAC

Como se ha especificado anteriormente, un hormigón autocompactante debe cumplir simultáneamente sus propiedades en estado fresco como son su fluidez y su capacidad de paso, por lo que su dosificación debe de estudiarse cuidadosamente.

Los rangos típicos de cantidades y proporciones para la obtención de un HAC son las siguientes:

- La razón agua/fino en volumen debe ser de 0.8 a 1.0 y de 0.3 a 0.4 en peso.
- El contenido total de finos debe estar entre 450 a 600 Kg/m<sup>3</sup>.
- El contenido de arena deberá ser mayor al 40% del volumen del mortero y al 50% del árido combinado en peso.
- El contenido de agua no debe exceder 200 litros/m<sup>3</sup>.
- La pasta (cemento más agua y adiciones) debe ser mayor al 40% del volumen de la mezcla.

Siguiendo los rangos anteriores, y tomándolos como recomendaciones se obtuvo un diseño de mezcla inicial del hormigón patrón, en función de los requerimientos de autocompactabilidad que deben ser necesarios para diseñar este tipo de hormigón, se confeccionaron tres mezclas con distinta cantidad de aditivo para encontrar y obtener un diseño de mezcla óptimo para lograr confeccionar hormigón autocompactante de resistencia promedio de 300 kgf/cm<sup>2</sup>.

La tabla 31 muestra la dosificación del hormigón patrón con un 0,5% de cantidad de aditivo, se toma esta referencia de la tesis de Gisela Morales Severino "Evaluación de la retracción hidráulica en Hormigones Autocompactantes con adición de fillers de caucho" de la Universidad de Valparaíso, esta investigación arrojó que con el aditivo Sika Viscocrete 5100 en un 0,5% se obtienen mejores propiedades de autocompactante.

Pero al realizar la experiencia del hormigón patrón la cantidad de aditivo fue aumentada de 0,5% que era lo inicial a 0,64% para obtener los mejores resultados autocompactantes.

Tabla 31: Dosificación Hormigón patrón.

Tratamiento	%	Agua (Lts/m <sup>3</sup> )	Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	Gravilla (Kg/m <sup>3</sup> )	Arena (Kg/m <sup>3</sup> )	Filler (Kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg)
Hormigón Patrón	-	200	500	625	781	156	0,125

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo al factorial experimental presentado anteriormente, se consideró la fabricación de 1 hormigón patrón y 6 hormigones autocompactantes de acuerdo a los tratamientos establecidos. Los resultados de la dosificación se presentan en la Tabla 31 en donde la arena fue reemplazada por el vidrio molido y también otras donde la grava fue reemplazada por escoria de cobre en 2 porcentajes distintos de 20% y 60%, También la adición de fibras en 2 porcentajes de 600 gr/m<sup>3</sup> y 900 gr/m<sup>3</sup>.

La dosificación se realiza en volumen por las distintas densidades de los áridos a reemplazar en el hormigón, la dosificación patrón se pasa a volumen como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 32: Dosificación en volumen (lt).

		Agua	Cemento	Gravilla	Arena	Filler	Aditivo	Escoria	Vidrio	Fibras
Tratamiento	%	(lt)	(lt)	(lt)	(lt)	(lt)	(lt)	(lt)	(lt)	(Kg/m <sup>3</sup> )
Hormigón Patrón	-	200	333,33	410,37	469,35	116,77	2,96	-	-	-
Hormigón con Escoria	20%	200	333,33	328,30	469,35	116,77	2,96	82,07	-	-
Hormigón con Escoria	60%	200	333,33	164,15	469,35	116,77	2,96	246,22	-	-
Hormigón con Vidrio	20%	200	333,33	410,37	375,48	116,77	2,96	-	93,87	-
Hormigón con Vidrio	60%	200	333,33	410,37	187,74	116,77	2,96	-	281,61	-
Hormigón con Fibras	600 gr/ m3	200	333,33	410,37	469,35	116,77	2,96	-	-	0,021
Hormigón con Fibras	900 gr/ m3	200	333,33	410,37	469,35	116,77	2,96	-	-	0,032

Fuente : elaboración propia.

Luego se transforma la dosificación a kilogramos nuevamente con sus respectivas densidades de los áridos como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 33: Dosificación en Peso.

		Densidades	1000	1500	1523	1664	1336	1080	2099	1567	
Tratamiento	%	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )
Hormigón Patrón	-	200	500	625	781	156	3,2	-	-	-	-
Hormigón con Escoria	20%	200	500	500	781	156	3,2	172,28	-	-	-
Hormigón con Escoria	60%	200	500	250	781	156	3,2	516,83	-	-	-
Hormigón con Vidrio	20%	200	500	625	624,8	156	3,2	-	147,09	-	-
Hormigón con Vidrio	60%	200	500	625	312,4	156	3,2	-	441,28	-	-
Hormigón con Fibras	600 gr/ m3	200	500	625	781	156	3,2	-	-	-	0,021
Hormigón con Fibras	900 gr/ m3	200	500	625	781	156	3,2	-	-	-	0,032

Fuente : elaboración propia.

La cantidad de litros por amasada determinará nuestra cantidad final para cada una de las amasadas que en este caso será de 35 litros.

Tabla 34: Dosificación para 35 lts.

0,035 m3										
Tratamiento	%	Agua (Lts/m <sup>3</sup> )	Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	Gravilla (Kg/m <sup>3</sup> )	Arena (Kg/m <sup>3</sup> )	Filler (Kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg)	Escoria (Kg/m <sup>3</sup> )	Vidrio (Kg/m <sup>3</sup> )	Fibras (Kg/m <sup>3</sup> )
Hormigón Patrón	-	7,00	17,50	21,88	27,34	5,46	0,112	-	-	-
Hormigón con Escoria	20%	7,00	17,50	17,50	27,34	5,46	0,112	6,03	-	-
Hormigón con Escoria	60%	7,00	17,50	8,75	27,34	5,46	0,112	18,09	-	-
Hormigón con Vidrio	20%	7,00	17,50	21,88	21,87	5,46	0,112	-	5,15	-
Hormigón con Vidrio	60%	7,00	17,50	21,88	10,93	5,46	0,112	-	15,44	-
Hormigón con Fibras	600 gr/ m3	7,00	17,50	21,88	27,34	5,46	0,112	-	-	0,021
Hormigón con Fibras	900 gr/ m3	7,00	17,50	21,88	27,34	5,46	0,112	-	-	0,032

Fuente: Elaboración propia.

### 3.9.2.- Cuantificación de probetas utilizadas

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de probetas que se confeccionarán para el estudio experimental, cumpliendo con el requisito de efectuar 3 o más probetas para cada muestra en cuestión según las normativas de nuestro país.

Tabla 35: Cuantificación de probetas.

TIPOS DE PROBETAS	CANTIDAD		
	Retracción	Compresión	Amasadas
Probetas HAC Patrón	3	3	1
Probetas 20% reemplazo de escoria de cobre	3	3	2
Probetas 60% reemplazo de escoria de cobre	3	3	3
Probetas 20% reemplazo de vidrio	3	3	4
Probetas 60% reemplazo de vidrio	3	3	5
Probetas 600 gr/m3 adición de fibras de polipropileno	3	3	6
Probetas 900 gr/m3 adición de fibras de polipropileno	3	3	7
<b>CANTIDAD DE PROBETAS</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	

Fuente elaboración propia.

### 3.9.3.- Medición retracción libre según norma NCh 2221.Of 94.

Inmediatamente después de desmoldar las probetas, sumergirlas en agua saturada con cal, a una temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  por un mínimo de 15 min en el caso de probetas de mortero y por un mínimo de 30 min para probetas de hormigón, con el fin de minimizar las variaciones por temperatura.

A una edad de  $24 \pm 0.5$  horas después del mezclado del agua con el cemento, proceder a efectuar las siguientes operaciones:

- a) Leer el dial del aparato medidor con la barra patrón y registrar como  $L_p$ .
- b) Retirar una probeta del baño de inmersión.
- c) Secar previamente con un paño las piezas de tope de la probeta y colocarla húmeda en el aparato medidor.
- d) Girar la probeta lentamente en el aparato medidor mientras se lee el dial. Registrar la menor lectura del dial como  $L_0$ , si el giro provoca una variación en la lectura
- e) Expresar la diferencia de longitud inicial  $L_i$ , con aproximación a 0,0025mm, como la diferencia entre las medidas  $L_p$  y  $L_0$ .
- f) Devolver la probeta al baño y repetir las operaciones desde b) para cada una de las siguientes probetas.

Después de la medida inicial de comparación se procede al periodo de curado: almacenar las probetas en agua saturada con cal ( $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ) hasta que hayan alcanzado 28 días incluyendo el periodo en moldado, a menos que se especifique otro periodo o condiciones de curado.

Al término del periodo de curado, almacenar las probetas en la cámara de secado, de modo que las probetas queden separadas a lo menos 25 mm en todos sus lados. Efectuar mediciones de la barra patrón y de cada probeta después de periodos de secado de 4, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 y 90 días a menos que se especifique cualquier otra edad. Estas mediciones deben realizarse en un recinto mantenido con una humedad relativa de  $50 \pm 4\%$  y una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . La temperatura debe controlarse, a lo menos, dos veces al día utilizando el sicrómetro aspirado.

#### ◇ Expresión de resultados

El cambio de longitud de cualquier probeta se mide de la siguiente manera:

$$L = \frac{L_x - L_i}{G}$$

L: cambio de longitud de la probeta a cualquier edad, mm/m;

$L_x$ : diferencia entre las lecturas de la probeta y de la barra patrón a la edad x, mm;

$L_i$ : diferencia inicial entre las lecturas de la barra patrón  $L_p$  y de la probeta  $L_0$ , mm;

G: longitud efectiva de medida (0,250 m).

Expresar el cambio de longitud del mortero u hormigón, con aproximación a 0,0025 mm/m como el promedio de los resultados de las n probetas a la edad x ( $n \geq 3$ ).



Figura 15: Ensayo de Retracción libre



Figura 16: Molde de retracción libre.

En la siguiente tabla se presenta la planificación de las lecturas realizadas en el hormigón autocompactante de acuerdo a la edad de éste.

Tabla 36: Planificación ensayo de retracción libre

Lectura	Estado del Hormigón	Tiempo de lectura (días)	Edad del Hormigón (días)	
<b>L1 Curado</b>	Periodo de curado	0	1	<b>Periodo de expansión</b>
<b>Lf Curado</b>	Periodo de curado	7	8	
<b>L4 Secado</b>	Periodo de secado	4	11	<b>Periodo de retracción</b>
<b>L7 Secado</b>	Periodo de secado	7	14	
<b>L14 Secado</b>	Periodo de secado	14	21	
<b>L21 Secado</b>	Periodo de secado	21	28	
<b>L28 Secado</b>	Periodo de secado	28	35	
<b>L90 Secado</b>	Periodo de secado	35	42	
<b>L42 Secado</b>	Periodo de secado	49	56	
<b>L90 Secado</b>	Periodo de secado	90	97	

Fuente: elaboración propia

El ensayo se va a realizar a los 7, 14, 21, 28, 35, 49, 90 días luego de su curado durante 7 días donde se mide expansión hidráulica debido a la sumersión en agua. A continuación son sacadas del agua y comienza su periodo de secado, a temperatura y humedad constante a partir de los 7 días de curado hasta los 97 días de edad. Durante este periodo también se controló la pérdida de peso de las probetas al momento de efectuar las lecturas.

### 3.9.4 Medición de compresión

#### Ensayo de compresión

El ensayo se debe realizar según la Nch 1037 Of 2009. Se va a determinar la resistencia a compresión a 21 probetas confeccionadas y curadas según NCh 1017 Of 75 estas probetas son cúbicas de 15x15x15 cm. este ensayo se va a realizar a los 28 días.

Las resistencias obtenidas de las probetas de 15x15 cm. se deben multiplicar por el factor de 0,95 y con esto obtener un equivalente a las probetas estandarizadas de 20x20 cm. según lo establecido en la NCh 170 Of 1985.

Se calcula la resistencia a compresión como la tensión de rotura según la formula siguiente:

$$R = \frac{P}{S}$$

En que:

R= Tensión de rotura, N/mm<sup>2</sup> (kgf/cm<sup>2</sup>).

P= Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo, N (kgf).

S= Sección de ensayo, mm<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>).

**Equipo de compresión:** el ensayo de compresión se realiza para determinar las propiedades de un material frente a una sollicitación axial negativa. Sollicitación que pretende comprimir la probeta de ensayo. Este ensayo se va a realizar a los 28 días de curado de las probetas.

Figura 17: Equipo de resistencia a compresión.



Fuente: elaboración propia

### 3.10.- Elaboración de hormigones y confección de probetas

La elaboración de hormigones autocompactantes se realizó en una betonera de volteo lateral de acuerdo a la dosificación obtenida y bajo el siguiente procedimiento.

- a) Cada vez que se confeccionó una amasada de hormigón autocompactante se realizó la corrección por humedad y absorción de los áridos para la dosificación antes de la elaboración.
- b) Al momento de la elaboración de los hormigones, primero se mezcla la gravilla, arena, filler y estos áridos se mezclan con el cemento hasta tener una mezcla homogénea. Luego se agregó el agua junto con el aditivo fluidificante, esta mezcla se revuelve durante 5 minutos. Así sucesivamente reemplazando el árido grueso por escoria de cobre, en otras amasadas reemplazando el árido fino por vidrio molino y otras con adición de fibras de polipropileno cave.
- c) Una vez confeccionada cada amasada de hormigón se determinó su autocompactibilidad del hormigón según el método de la caja L y cono de abrams invertido para poder cuantificar el grado de fluidez que debe tener este tipo de hormigón.

Figura 18: Ensayo de escurrimiento (cono de abrams invertido)



Fuente: elaboración propia

- d) Una vez realizados los ensayos y comprobar que este cumple con los requisitos que debe tener un hormigón autocompactante se llenan los moldes con hormigón tanto los que servirán para el ensayo de retracción hidráulica, como los que serán sometidos y será evaluada su resistencia a la compresión.

Figura 19: Moldes de ensayos a realizar



Fuente: elaboración propia

## 4.- Presentación y análisis de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de los distintos ensayos realizados que fueron considerados para la investigación, según los procedimientos que se encuentran descritos en el capítulo anterior, tanto para el ensayo destructivo como el ensayo de compresión realizado a los 28 días, como para el ensayo de medición de retracción libre a los 4, 7, 14, 21, 28, 35, 49 y 90 días (ensayo no destructivo).

El estudio y análisis de datos se presentan de acuerdo a la línea de investigación desarrollada en el programa experimental. Es decir, primero se realiza la comparación de retracción libre entre las distintas mezclas mediante el ensayo de la NCh 2221 Of 1994 y luego se realiza la comparación de resistencia a compresión mediante los procedimientos de ensayos de la NCh 1037 Of 2009, a los hormigones elaborados con distintas dosis de escoria de cobre como reemplazo de la grava, además de los hormigones elaborados con distintas dosis de vidrio como reemplazo de la arena, por otra parte los hormigones con la adición de fibras de polipropileno. Se evalúa la influencia que tienen cada uno de estos materiales y en distintas dosificaciones de reemplazo, por ende distinta dosificación, en la retracción hidráulica en hormigones autocompactantes y en las resistencias a compresión que se presentan.

Posteriormente se analizan los resultados de los ensayos complementarios considerados para la presente investigación: caja en L y extensión de flujo (cono invertido) de HAC.

Finalmente se presenta una recopilación de resultados de retracción libre en los hormigones, fabricados con cementos nacionales.

### 4.1 Propiedades del hormigón autocompactante en estado fresco.

Ya que existen muchos métodos de ensayos propuestos para evaluar la capacidad de autocompactación del hormigón, en esta investigación se decidió realizar 2 ensayos en estado fresco los cuales son el escurrimiento de cono invertido y la caja L. El objetivo de los ensayos es determinar la fluidez necesaria y la cohesión suficiente para que no se produzca segregación en la mezcla.

La tabla 37 muestra el registro de datos que se obtuvieron al momento de la elaboración de hormigones autocompactantes con distintas proporciones de reemplazo tanto del árido grueso por escoria de cobre y el vidrio molido por árido fino, estos en porcentajes de 20 y 60%. Además de la incorporación de fibras de polipropileno en dosis de  $600\text{gr/m}^3$  y  $900\text{gr/m}^3$ . Se fabricaron 7 mezclas distintas donde se controló su comportamiento en estado fresco, debiendo cumplir con los requisitos de dichos ensayos.

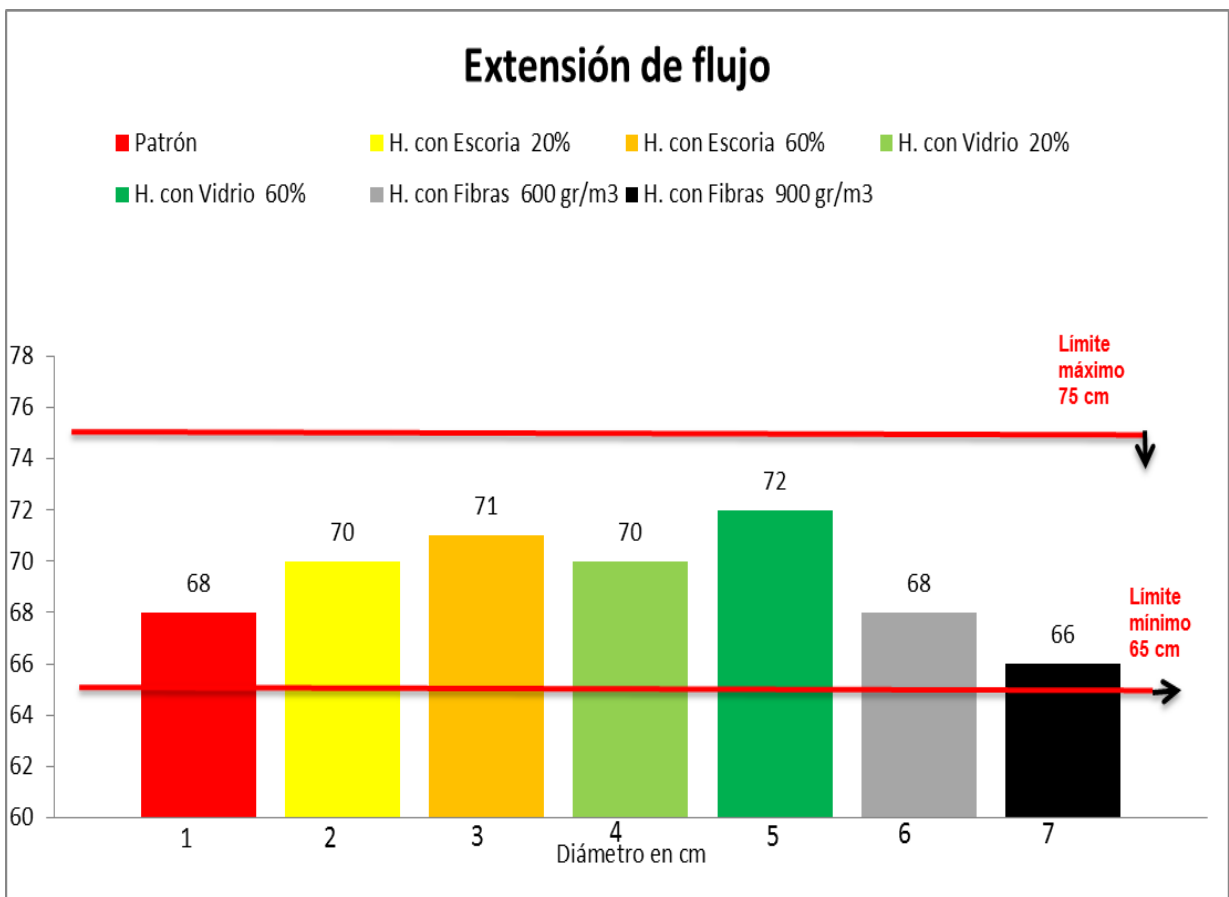
Tabla 37: Ensayos al hormigón autocompactante en estado fresco.

N°	Mezcla	Dosis de material	Fechas de elaboración	Extensión de flujo (cm)	Ensayo caja L	
					R (hf/hi)	T(s) a 40 cm
1	Patrón		6 de octubre	68	0,9	4,9
2	H. con Escoria	20%	6 de octubre	70	0,9	4,8
3	H. con Escoria	60%	8 de octubre	71	0,92	5
4	H. con Vidrio	20%	15 de octubre	70	0,88	4,9
5	H. con Vidrio	60%	13 de octubre	72	0,89	5,1
6	H. con Fibras	600 gr/m <sup>3</sup>	19 de octubre	68	0,87	5,5
7	H. con Fibras	900 gr/m <sup>3</sup>	20 de octubre	66	0,85	5,4

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 37 observando y analizando los resultados de los ensayos de cono de abrams invertido y caja en L, se realiza un promedio de los hormigones autocompactantes con distintos reemplazos y adición ensayados en laboratorio. Con el análisis de los datos obtenidos se llega a la siguiente Figura:

Figura 20: Ensayo de extensión de flujo.



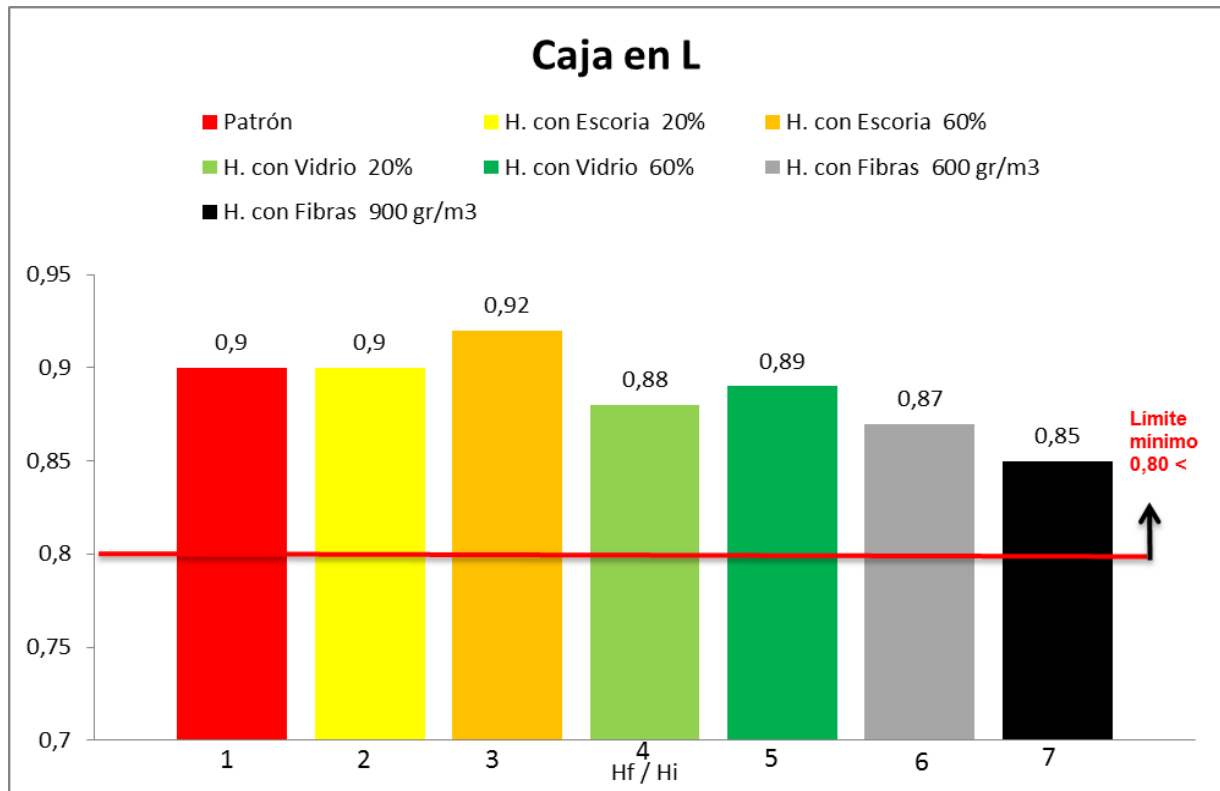
El ensayo de extensión de flujo (es el método más simple y el más utilizado, debido a la sencillez del equipo que se precisa. Está basado en el aparato y procedimiento del ensayo del cono de Abrams, el cual es probablemente el ensayo más universal para la determinación de la docilidad o trabajabilidad del hormigón fresco.

El objetivo de este ensayo es evaluar la habilidad o facilidad de fluir del hormigón. Se puede también valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación.

En la figura 21 se pueden observar las 7 mezclas realizadas en los laboratorios y se puede concluir que todas las mezclas cumplen con el objetivo de ser un hormigón autocompactante, ya que el ensayo de extensión de flujo señala que el escurrimiento de cono debe alcanzar un diámetro final dentro del límite mínimo que debe ser 65 cm. y límite máximo de 75 cm, por lo que los resultados obtenidos están dentro de los parámetros requeridos.

En la figura 21 se muestra el gráfico realizado con los datos obtenidos del ensayo Caja en L.

Figura 21: Ensayo caja en L



Fuente: Elaboración Propia.

El ensayo de caja L (UNE 83363:2007), este ensayo consiste en llenar el depósito y dejar fluir el hormigón hacia el canal a través de las armaduras. A través de este ensayo se determinó el tiempo que tarda el hormigón en llegar a una distancia de 400 mm (T40), y las alturas H final y H inicial que se alcanzan en ambos extremos de la parte horizontal, con la mezcla ya en reposo. La razón Hf/Hi se define como el coeficiente de bloqueo (CB).

Este ensayo debe cumplir que el tiempo transcurrido en llegar el hormigón al extremo debe estar entre 3 y 6 segundos y que el  $H_f / H_i > 0.80$ .

Como se puede observar en el gráfico anterior todas las mezclas de hormigón autocompactante cumplen con el coeficiente de bloqueo superior de 0,8, cumpliendo con el requisito de dicho ensayo.

## 4.2.- Ensayo de retracción libre

Los resultados obtenidos en esta parte de la investigación corresponden al cambio de longitud que experimenta una probeta prismática en condiciones de secado constante, y siguiendo la metodología indicada en la NCh 2221.

La figura 22 se muestra la cámara de secado donde fueron almacenadas las probetas. En esta cámara se debe tener una temperatura de  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  y a una humedad relativa de  $54 \pm 4\%$ . Bajo estas condiciones se realizan las mediciones de retracción libre.

Figura 22: Cámara de secado



Fuente: elaboración propia

Las lecturas obtenidas mediante el aparato medidor se llevaron a deformación unitaria que corresponde a la expansión o retracción hidráulica de las probetas frente a la pérdida de agua en estado endurecido.

Luego de la confección y el desmolde de las probetas prismáticas, estas pasan por un periodo de curado de 7 días donde se midió la expansión hidráulica que experimentan las probetas debido a la sumersión en agua. A continuación son sacadas del agua y comienza su período de secado, a temperatura y humedad constante a partir de los 7 días de curado hasta los 42 días de edad. Durante este período también se controló la pérdida de peso de las probetas al momento de efectuar las lecturas.

#### 4.2.1.- Retracción hidráulica

En este análisis se presentan los resultados de retracción hidráulica obtenidos mediante el ensayo de retracción libre.

A continuación se presenta una tabla que muestra los resultados de expansión hidráulica promedio durante el periodo de curado (0 a 7 días) y luego la retracción hidráulica promedio para el periodo de secado de 90 días (del día 11 al 97) que experimentan los hormigones autocompactantes con distintos reemplazos y adición.

Tabla 38: Expansión y Retracción Hidráulica.

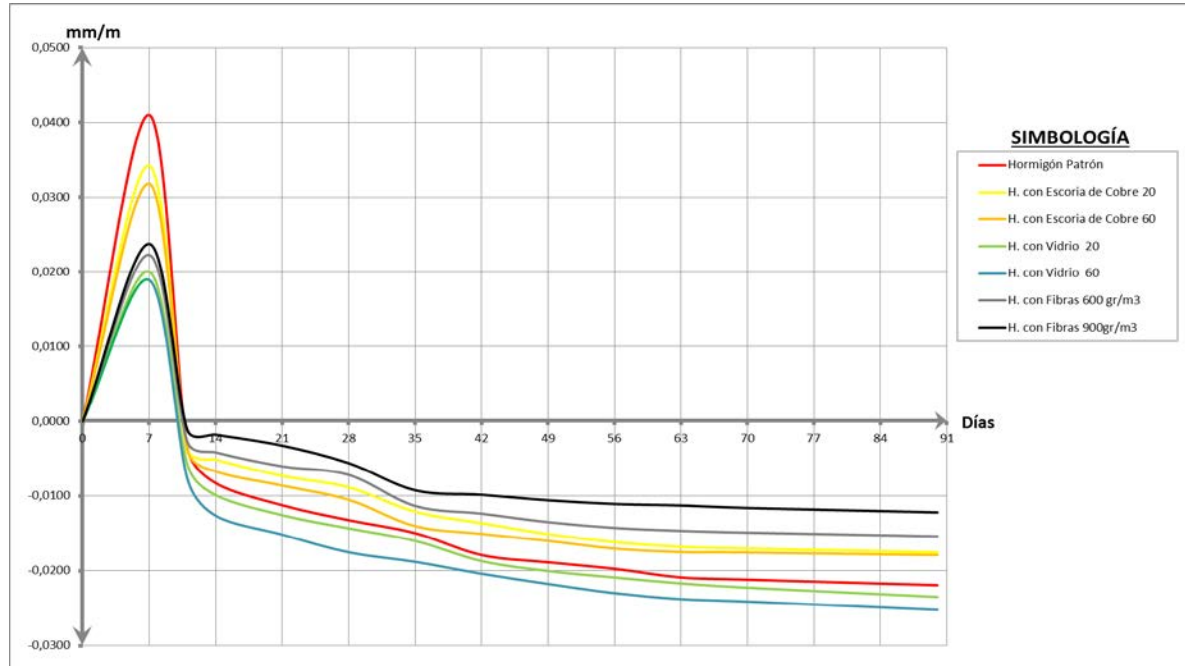
Retracción mm/m Acumulado	%	EXPANSIÓN HIDRAULICA (mm/m)		RETRACCIÓN HIDRAULICA (mm/m)										
		0	7	Edad del hormigón autocompactante (días)										
				11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
Hormigón Patrón	-	0,0000	0,0410	-0,0035	-0,0083	-0,0112	-0,0132	-0,0150	-0,0179	-0,0189	-0,0197	-0,0209	-0,0212	-0,0219
H. con Escoria de Cobre	20	0,0000	0,0342	-0,0037	-0,0051	-0,0073	-0,0088	-0,0121	-0,0136	-0,0151	-0,0162	-0,0168	-0,0170	-0,0175
H. con Escoria de Cobre	60	0,0000	0,0318	-0,0038	-0,0067	-0,0086	-0,0105	-0,0140	-0,0151	-0,0160	-0,0170	-0,0175	-0,0176	-0,0179
H. con Vidrio	20	0,0000	0,0200	-0,0057	-0,0099	-0,0126	-0,0143	-0,0160	-0,0187	-0,0200	-0,0209	-0,0217	-0,0223	-0,0235
H. con Vidrio	60	0,0000	0,0189	-0,0076	-0,0126	-0,0152	-0,0175	-0,0188	-0,0204	-0,0218	-0,0230	-0,0238	-0,0241	-0,0252
H. con Fibras	600 gr/m <sup>3</sup>	0,0000	0,0223	-0,0027	-0,0042	-0,0060	-0,0072	-0,0113	-0,0124	-0,0135	-0,0143	-0,0147	-0,0149	-0,0154
H. con Fibras	900gr/m <sup>3</sup>	0,0000	0,0237	-0,0011	-0,0018	-0,0033	-0,0056	-0,0092	-0,0098	-0,0106	-0,0111	-0,0113	-0,0116	-0,0122

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior durante el periodo de curado (0 a 7 días) la totalidad de las probetas presentan expansión debido a la sumersión en agua, esto se puede apreciar en los datos ya que todos los valores obtenidos durante este periodo tienen signo positivo, lo que explica la expansión. Por el contrario, todos los datos que se observan entre el día 11 en adelante tienen signo negativo, lo que explica la retracción hidráulica en el periodo de secado de las probetas.

A continuación el gráfico se presenta la evolución de la expansión y retracción hidráulica de los hormigones en el tiempo.

Figura 23: Retracción Hidráulica



Fuente: Elaboración Propia.

Como se muestra en el gráfico la totalidad de las mezclas presentan un comportamiento normal, lo que quiere decir es que durante el periodo de curado (0 a 7 días) todas las mezclas presentan expansión y durante el periodo de secado (7 a 42 días) todas presentan retracción hidráulica.

Además en el gráfico se pueden apreciar varias tendencias, por lo que las probetas con reemplazo de vidrio molido sufren menos expansión hidráulica que otros hormigones autocompactantes ya que es un hormigón más impermeable. También se puede apreciar que los HAC con incorporación de fibra tienden a resistir mejor los esfuerzos de tracción por lo que la retracción hidráulica a los primeros días en este hormigón es menor. Más adelante se realizará un análisis comparativo más extenso.

#### 4.2.2.- Pérdida de peso en Hormigones.

La pérdida de peso de las probetas se controló con una balanza de precisión de 0.1 (gr). Estos valores permiten observar la pérdida de agua de las probetas al mismo tiempo que se midió la retracción hidráulica.

La evolución de la pérdida de peso en hormigones aumenta a medida que aumenta el tiempo de secado de las probetas, como se muestra en la figura existe una tendencia para la pérdida de peso que señala que posiblemente existe un valor límite de pérdida de peso ya que las curvas de todas las

mezclas estudiadas mantienen una curva similar, lo que hace suponer que existe un valor límite constante en el tiempo. Además podemos visualizar en la gráfica que el hormigón patrón pierde más peso durante el tiempo en comparación a todos los otros hormigones con distintos reemplazos. Esto queda de manifiesto en el gráfico a continuación que señala la pérdida de peso en porcentaje acumulado en el tiempo.

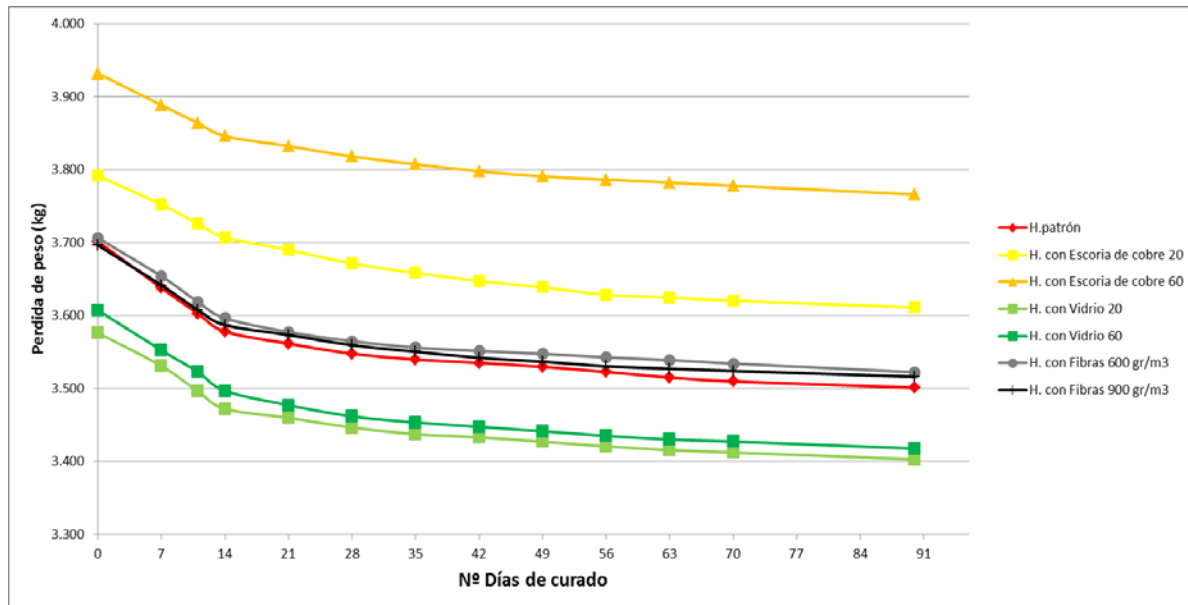
La siguiente tabla señala la pérdida de peso de hormigones en el tiempo de secado.

Tabla 39: Pérdida de Peso de hormigones autocompactantes.

PERDIDA DE PESO (grs)															
	%	0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90	
H.patrón	-	3.701	3.638	3.603	3.578	3.561	3.548	3.540	3.535	3.530	3.523	3.515	3.510	3.501	
H. con Escoria de cobre	20	3.792	3.752	3.726	3.707	3.690	3.671	3.658	3.647	3.639	3.628	3.625	3.620	3.611	
H. con Escoria de cobre	60	3.932	3.888	3.864	3.846	3.832	3.818	3.807	3.798	3.791	3.786	3.782	3.778	3.766	
H. con Vidrio	20	3.576	3.531	3.496	3.472	3.460	3.446	3.437	3.433	3.427	3.421	3.416	3.412	3.403	
H. con Vidrio	60	3.607	3.552	3.523	3.497	3.477	3.462	3.453	3.447	3.441	3.435	3.430	3.427	3.418	
H. con Fibras	600 gr/m3	3.706	3.654	3.619	3.596	3.577	3.565	3.556	3.551	3.547	3.543	3.539	3.534	3.522	
H. con Fibras	900 gr/m3	3.696	3.641	3.608	3.587	3.573	3.559	3.550	3.542	3.537	3.530	3.527	3.524	3.516	

Fuente: elaboración propia

Figura 24: Grafico Pérdida de Peso.



Fuente: Elaboración propia.

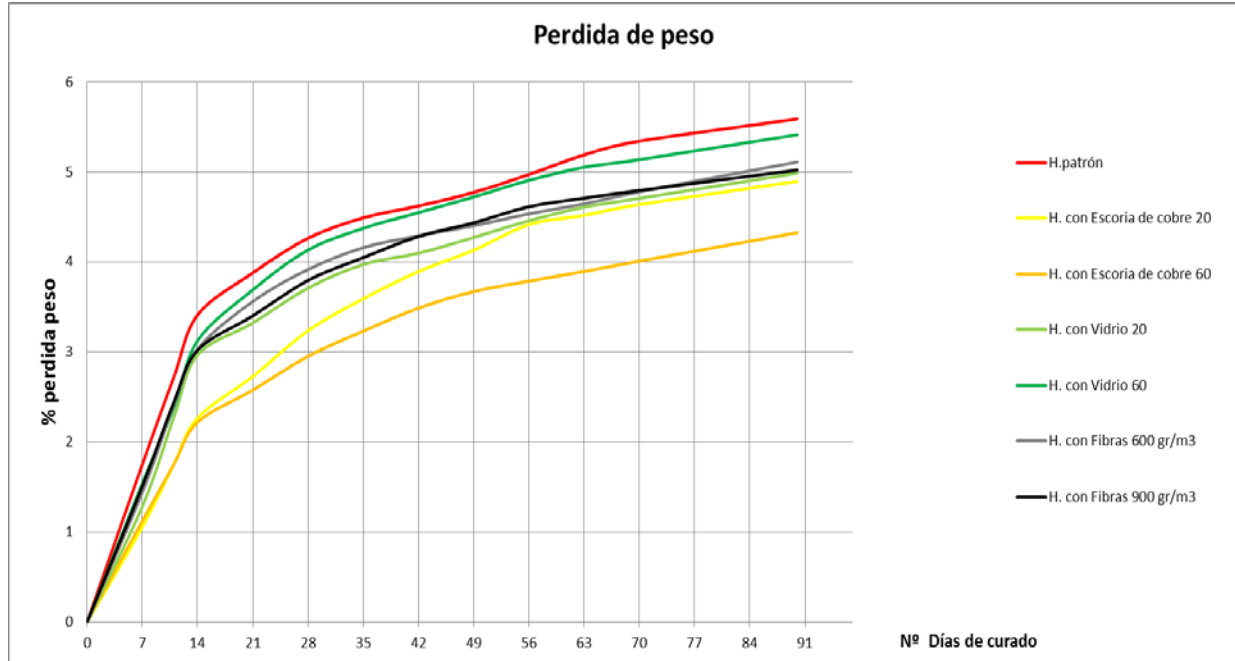
Además en la siguiente tabla se muestra la pérdida de peso en % acumulado en el tiempo de secado:

Tabla 40: Pérdida de peso en hormigones medido en %.

PERDIDA DE PESO PORCENTAJE ACUMULADO	%													
		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
H.patrón	-	0,00	1,75	2,72	3,41	3,88	4,26	4,49	4,62	4,77	4,97	5,19	5,34	5,59
H. con Escoria de cobre	20	0,00	1,06	1,76	2,27	2,73	3,24	3,59	3,89	4,13	4,42	4,52	4,64	4,90
H. con Escoria de cobre	60	0,00	1,12	1,75	2,22	2,58	2,95	3,23	3,49	3,67	3,79	3,90	4,01	4,33
H. con Vidrio	20	0,00	1,28	2,28	2,97	3,32	3,71	3,97	4,10	4,27	4,46	4,61	4,71	4,99
H. con Vidrio	60	0,00	1,54	2,38	3,12	3,69	4,13	4,37	4,55	4,72	4,91	5,05	5,14	5,41
H. con Fibras	600 gr/m3	0,00	1,44	2,41	3,03	3,56	3,92	4,16	4,29	4,40	4,53	4,65	4,78	5,11
H. con Fibras	900 gr/m3	0,00	1,51	2,44	3,02	3,40	3,80	4,05	4,28	4,44	4,61	4,71	4,79	5,02

Fuente: Elaboración propia.

Figura 25: Grafico Pérdida de peso en hormigones medido en %.



Fuente : Elaboración propia.

### 4.3.- Resistencia a compresión

En esta sección del capítulo se van a señalar los distintos resultados que presentó el ensayo de resistencia a compresión en las 7 mezclas de hormigón autocompactante realizadas en probetas cúbicas de 15 cm. A cada serie de hormigón se le realizará una repetición de 3 probetas hermanas, sacando posteriormente el promedio de cada una de ellas. Este ensayo fue realizado de acuerdo a las condiciones establecidas en la NCh 1037 Of 77.

**Figura 26: Ensayo de compresión**



Fuente: elaboración propia

Para este ensayo se realizaron 21 probetas las que se deben someter al ensayo de compresión, 3 por cada mezcla de hormigón autocompactante.

Cada una de las probetas utilizadas para este ensayo son de sección 15 x 15 cm por lo que cada resultado que se va a obtener se debe multiplicar por un factor de 0,95 y con esto obtener un equivalente a las probetas estandarizadas de 20 x 20 cm.

La siguiente tabla presenta los resultados de ensayo a compresión promedio a los 28 días de edad de cada probeta de hormigón autocompactante, desviación estándar y coeficiente de variación.

Tabla 41: Resistencia compresión

<b>Resistencia a Compresión</b>		<b>Kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>Desviacion estandar</b>	<b>Coef. Variacion(%)</b>	
H. Patron	-	0	327,79	12,81	3,91
H. con escoria de cobre	20	0	328,41	3,62	1,10
H. con escoria de cobre	60	0	335,07	9,32	2,78
H. con vidrio	20	0	326,24	9,04	2,77
H. con vidrio	60	0	309,74	5,16	1,67
H. con fibra	600 grs/m <sup>3</sup>	0	329,24	14,08	4,28
H. con fibra	900 grs/m <sup>3</sup>	0	328,74	9,21	2,80

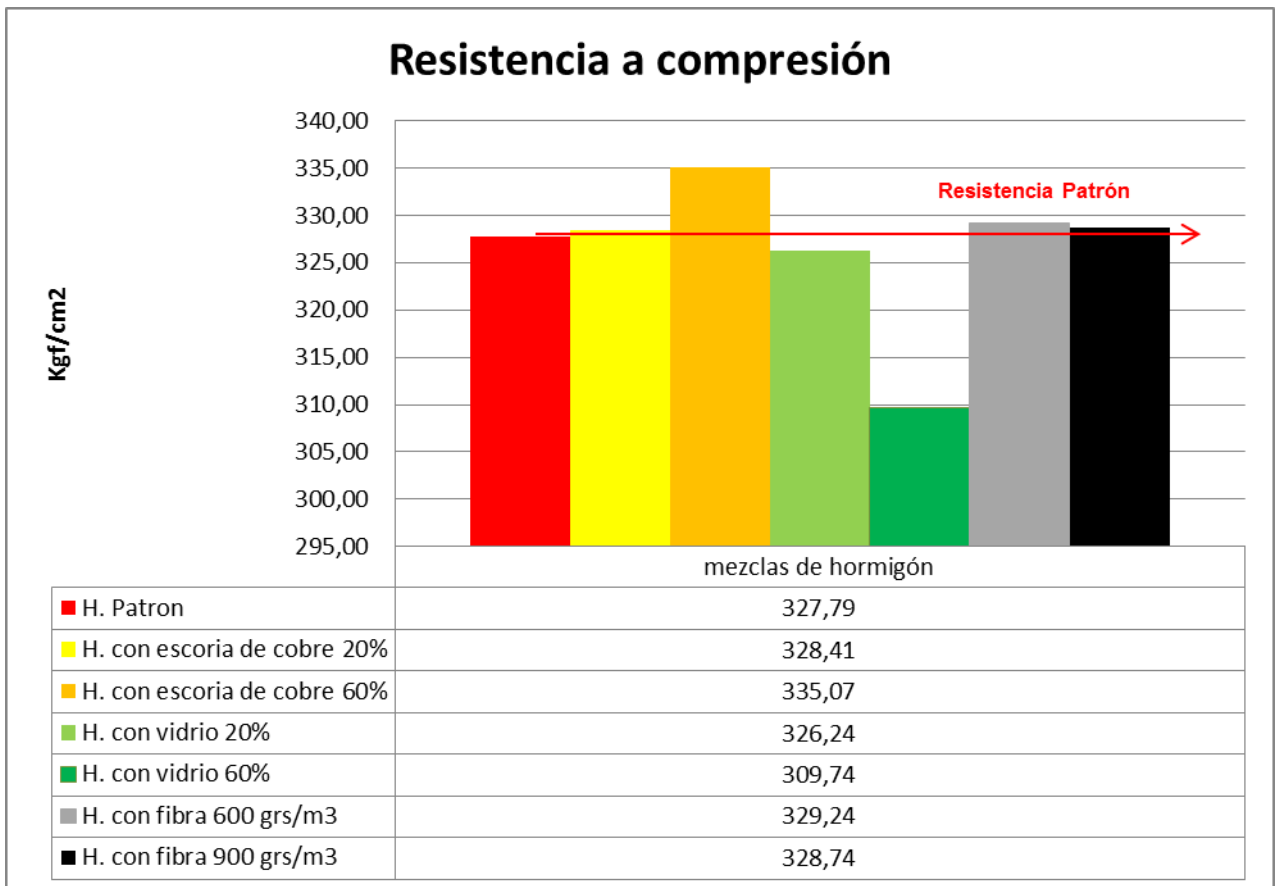
Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla anterior se puede apreciar que la resistencia a compresión es mayor en el hormigón con un reemplazo de 60% de escoria de cobre superando así al patrón, se puede obtener además que las resistencias más bajas las obtiene el hormigón con reemplazo de árido fino por vidrio molido.

Por otro lado se puede observar que todos los hormigones tienen una desviación menor a 14 [Kgf/cm<sup>2</sup>], lo cual es calificado como un parámetro de dispersión excelente según la norma ACI 214.

En el caso del coeficiente de variación, el valor más desfavorable lo presenta el hormigón con adición de fibras con 4,28% lo que indica una precisión muy aceptable y que la media es totalmente representativa de la muestra.

Figura 27: Resistencia a compresión.



Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico se puede observar que la resistencia a compresión de los hormigones con escoria de cobre aumentan su resistencia al aumentar su porcentaje de reemplazo, en el caso de los hormigones con reemplazo de vidrio se puede apreciar que al aumentar su dosis su resistencia baja considerablemente, aun así las resistencias en comparación con el hormigón patrón es inferior.

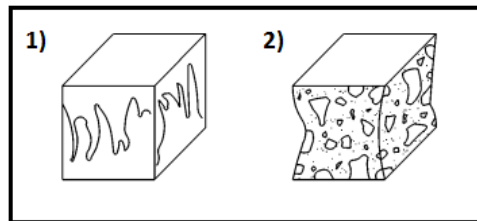
En el caso de los hormigones con la adición de fibras de polipropileno mantienen resistencias muy similares a las obtenidas en el hormigón patrón, aún así siguen siendo superiores.

Por último se puede observar que todos los hormigones cumplieron con los requerimientos mínimos de resistencia a los 28 días ( $250 \text{ kg/cm}^2$ ) establecidos por la NCh148.Of 68 para cementos de grado corriente.

➤ **Observaciones del ensayo:**

Todas las probetas cumplieron con los patrones de rotura bajo carga máxima satisfactoria. La figura 28 muestra los patrones de rotura satisfactorios en compresión.

Figura 28: Patrones de rotura satisfactorios.



Fuente: Norma Española, UNE-EN 12390-3

En el momento del desarrollo del ensayo se observó una diferencia en los patrones de rotura bajo la carga máxima satisfactoria en compresión.

En el caso del hormigón patrón, este se comportó como el caso 2 de la figura anterior. Al llegar a su máxima carga, el puntero fue bajando de forma constante.

Para los casos de hormigón autocompactante todos se comportaron como el caso 1 de la figura 28. Al llegar a su máxima carga el conteo de carga de la máquina llega a su punto más alto y luego empieza a descender lentamente.

## 5 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados en la presente investigación, además del análisis que involucra la interpretación que se obtienen de estos datos, se puede concluir lo siguiente:

- Con respecto a los ensayos en estado fresco para determinar su fluidez, docilidad y capacidad de paso entre las armaduras, se concluye que los materiales reemplazados y también la adición influyen pero de baja manera en el hormigón autocompactante no afectando en su condición de autocompactante.
- Los hormigones con reemplazo de escoria presentaron una mejoría en la retracción hidráulica con respecto al patrón tanto en el reemplazo de 20% y de 60% siendo la primera la con mejor resultados, esto se debe a que las propiedades de la escoria de cobre tales como su densidad y su baja absorción realiza un mejor confinamiento de la pasta de cemento en una porción de 20% quedando una mezcla más homogénea. La segunda tuvo buenos resultados con respecto al hormigón patrón pero la retracción fue mayor que los hormigones con reemplazo de 20%.

Por lo tanto, la escoria de cobre reduce la retracción en hormigones autocompactantes en aproximadamente 20,06% con un reemplazo de 20% de escoria y en cerca de 18,38% para un 60% de reemplazo, con esto la teoría que señalaba que un árido de mayor densidad reduce la retracción se confirma.

En tanto su resistencia a compresión se ve aumentada en un 0,18% en el caso de la incorporación de 20% de escoria con respecto a la resistencia del hormigón patrón, y en el reemplazo de 60% de escoria la resistencia se ve aumentada en un 2,21%. La escoria de cobre además de reducir el fenómeno de la retracción aumenta su resistencia a compresión, por lo que se considera un buen material a emplear ya que mejora las propiedades del hormigón autocompactante.

- El análisis para los hormigones con reemplazo de árido fino por vidrio molido, y según los resultados obtenidos podemos encontrar que en el reemplazo de 20 % a los 90 días muestra una retracción superior en un 7,14 % que el hormigón patrón y para el caso de las probetas con reemplazo de 60% se obtuvo un promedio que indica que al igual que con reemplazo de 20% aumentó el fenómeno de la retracción en un 15,04% por sobre el valor del patrón.

Para los resultados obtenidos del ensayo a compresión podemos apreciar que para el caso de un reemplazo de 20% tiene una disminución de su resistencia de aproximadamente un 0,48% y con respecto al hormigón con reemplazo de un 60% de vidrio molido se observa una mayor disminución de su resistencia de 5,5%.

Con los datos obtenidos tanto para la retracción y la resistencia a compresión podemos observar que el reemplazo de vidrio molido por el árido fino en un hormigón autocompactante, no contribuye en mejorar sus propiedades ni fenómenos, por lo que se concluye que el vidrio no aporta mejorías en este tipo de hormigones, por el contrario, empeora el fenómeno por el cual está basado este estudio.

- Por último los hormigones con adición de fibras de polipropileno cave, realizando un análisis a todos los resultados obtenidos en los laboratorios se obtiene que este material resulta beneficioso, mejorando sus propiedades físicas con respecto al patrón.

La adición de 600 gr/m<sup>3</sup> que es la dosis recomendada por el fabricante resulta con una disminución de su retracción en un 29,78%, y evaluando las probetas realizadas se determinó un aumento de 0,44% en la resistencia a compresión a los 28 días frente al hormigón patrón.

Además en esta investigación se propuso un aumento de la dosis recomendada por el fabricante llegando a incorporar 900 gr/m<sup>3</sup> lo que arrojó resultados positivos según lo buscado en esta tesis, este material mejoró cerca de 44,37% su retracción a los 90 días, con esto marcando el material y la dosis que más corrige el fenómeno. Por otro lado se obtuvo una mejora en su resistencia a compresión en 0,28% sobre la resistencia patrón.

Con respecto a lo comentado anteriormente y analizando los resultados obtenidos se puede concluir que hasta los 90 días, las probetas de hormigón autocompactante que se comportaron mejor al fenómeno de la retracción hidráulica fueron las fibras de polipropileno ya que estas mejoran la resistencia a esta fuerza impuesta al hormigón como es la retracción hidráulica.

La escoria de cobre se puede concluir que gracias a sus características físicas es un buen material para evitar la retracción y además de un excelente material para mejorar la resistencia a compresión.

Por otra parte el vidrio molido en sus dos dosificaciones aumentan la retracción y bajan la resistencia en comparación con el hormigón patrón, por lo que se comprueba que la absorción de agua de un material no es tan importante, ya que esto se puede manejar en la dosificación, por lo que el vidrio para un hormigón autocompactante no es recomendable.

Finalmente los resultados obtenidos son positivos conforme a la hipótesis planteada en un principio, y se concluye que la adición de fibras mejora la retracción por sobre la de un árido de mayor densidad.

## 2.6 Futuras Investigaciones

A continuación se presentan algunas recomendaciones para posibles futuras investigaciones.

- Se propone realizar un estudio de hormigones autocompactantes confeccionados con arena de escoria de cobre en distintos porcentajes de reemplazo ya que confinaría de mejor manera la pasta reduciendo la retracción
- Realizar la presente investigación añadiendo más porcentajes de reemplazo de escoria de cobre para así determinar cuál es la dosis más adecuada que genera los mejores resultados en la retracción.
- También se propone realizar una investigación con distintos tipos de fibras y de distintos tamaños para ver el comportamiento del hormigón autocompactante.
- Se sugiere realizar un estudio sobre la permeabilidad y la resistencia a tracción sobre los hormigones autocompactantes con escoria de cobre y con fibras de polipropileno.

## 6.- Referencias bibliográficas.

**Ache (2008).** Hormigón Autocompactante: Diseño y aplicación. ACHE, Madrid, España.

**ACI 237R-07(2007)** – Informe del ACI sobre hormigón autocompactable

**ACI (2008).** Building Code Requirements for Structural Concrete.

**AFGC (2000),** Betons Auto-Plaçants: Recommandations Provisoires. Association Française de Génie Civil, 63 p.

**Agranati L, G. (2008).** Estudio sobre la aplicabilidad de los modelos de cálculo de la fluencia y retracción al hormigón Autocompactante. Tesis doctoral. ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

**Ahmed Loukili, (2011),** *Self Compacting Concrete*, Primera edición, Willey & Sons.

**Alejandro Mata y Carlos Gálvez,** "Conocimiento del proceso de reciclaje de envases de vidrio; propuestas de mejora del proceso actual y análisis costo-beneficio de la implantación del mismo en la planta Vidriera Guadalajara", Universidad Autónoma de Guadalajara

**Añojo 17 de la Instrucción EHE-08** (Normativa Española de Hormigón Estructural).

**Assié S, Escadeillas, G. and Marchese, G. (2003).** "Durability of self-compacting concrete" Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings pro033, pp. 655-662.

**Bartos, J. M., (2000)** "Measurement of Key Properties of Fresh Self-compacting Concrete", CEN/PNR Workshop, Paris.

**Bartos, J. M. and Grauers, M.(1999).** Self- compacting concrete, Concrete, 33 (4), pp. 9-13.

**BERMEJO, ESTER (2009)** - DOSIFICACIÓN, PROPIEDADES Y DURABILIDAD EN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE PARA EDIFICACIÓN – Págs.1-36

**Bernardo De la Peña.-** Jefe Departamento Técnico Sika S.A. Chile.(Revista BIT, Junio 2001)

**Bernardo De la Peña** - Revista Ingeniería de Construcción – Volumen 15 N° 2 junio – diciembre 2000

**BILLBERG, P.(1999).**Self- Compacting Concrete for Civil Engineering Structures – The Swedish Experience. CBI Report, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Estocolmo, Suecia, 80 p.

**Carlos Catalán Arteaga (2013)** Estudio de la Influencia del Vidrio Molido en Hormigones Grado H15, H20, Y H30, Tesis de Pregrado. Universidad Austral de Chile.

**Chan, Y.W. [et al.]** - The analysis of Shrinkage behavior of SCC and OPC under various weather conditions. RILEM Proceedings PRO 17, 2004. ISBN: 2-912143-20-9.

**Chopin, D., Francy, O., Lebourgeois, S. and Rougeau, P. (2003).** "Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC)". Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings pro033, pp. 672-683.

**Cuellar et all. (2009)** Fisuras por retracción en el hormigón. Tesis de Pregrado, Escuela superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.

**De la Peña R. Bernardo (junio 2001)**. "Hormigón Autocompactante", Revista BIT, pp. 7-12.

**DE SCHUTTER, G. [et al.]** - Self-Compacting Concrete, CRC Press, 2008. 296p. ISBN 978-1904445-30-2.

**Dehn, F., K. et al (2000)** Holschemacher, and D. Weisse, "Self-Compacting Concrete - Time Development of the Material Properties and the Bond Behavior", LACER No. 5, pp.115-123.

**EFNARC (2002)** - Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable – HAC

**Felipe Carvajal Díaz (2014)** Influencia de la Incorporación de Vidrio Reutilizado como Reemplazo Parcial de Arena, sobre la retracción hidráulica, Permeabilidad y Estabilidad Volumétrica del Hormigón. Tesis de Pregrado, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

**GETTU (2004)**. Estado del Arte del Hormigón Autocompactable y su caracterización. Parte I. Cemento y Hormigón. Abril 2004. pp. 50-67).

**GIBBS, J., ZHU, W. (1999)**, Strength of hardened self compacting concrete. First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm.

**GOMES, P. (2002)**. Optimización y caracterización del hormigón autocompactante de alta resistencia. Escuela Técnica Superior de Caminos Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

**Imasatec (2006)**. Visión del constructor, en Aditivos, Adiciones y Tratamientos especiales para hormigón y mortero. VI Simposio ANFAH, Valencia.

**IZQUIERDO, J. (2001)**. Hormigón Autocompactable . Hormigón Preparado N° 49. pp. 33-37. 2001.

**Leeman, A. and Hoffmann, C. (2005)** "Properties of self-compacting and conventional concrete-differences and similarities". Magazine of concrete Research, 57 (3), pp. 315 – 319.

**M. Loreto Nuñez Morales (1995)** Estudio Del Hormigón con Fibras de Polipropileno, Tesis de Pregrado, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile

**MUNIZAGA (Abril 2009)**. – Fisuración por retracción en hormigones: influencia del tipo de cemento. Pág. 8 Departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile.

**Neville, Adam M., 1977**. "Tecnología del Concreto"

**Neville, A.M. (1995)**. Properties of Concrete, 4th ed., Longman Group, Londres, Inglaterra.

**NEVILLE, A.M. (1997)**. Properties of Concrete. Fourth Edition. Editorial Longman. London. England.

**Newman, J., Choo, B.S. , (2003)**. Advanced concrete Technology.

**OKAMURA, H. [et al.] (1996)** - Self-Compactable High-Performance Concrete in Japan. ACI special publication SP159-02, p. 31-44.

**OKAMURA, H. (1997)**. - Self Compacting High-Performance Concrete. Journal of Concrete International, vol. 19, n° 7, p. 50-54.

**OKAMURA, H. and Ouchi, M. (1999).** "Self-Compacting Concrete Development, Present and Future". Proceedings of the First International RILEM Symposium, pp. 3-14.

**OKAMURA et al, (2000).** "Self compacting concrete". Structural Concrete, 1, pp. 3-17.

**OKAMURA, H., Ozawa, K. and Ouchi, M. (2000).** "Self compacting concrete". Structural Concrete, 1, pp. 3-17.

**POPPE, A. [et al.]** - Creep and shrinkage of self compacting concrete. RILEM PRO 42, 2005. P.329-336. ISBN: 2-912143-61-6.

**PERSSON, B. (2005).** "Shrinkage and creep of high performance self-compacting concrete (HPSCC)", ACI special Publication SP220-11, pp.155-179.

**PETERSSON, (1999).** Workability of the Self-Compacting Concrete. Brite EuRam Program: Rational production and improved working environments through using self-compacting concrete. Task 2. pp. 1-56.

**Petersson, Billberg, P. y Van, B.K. (1996),** A Model for Self-Compacting Concrete. Production Methods and Workability of Concrete, Eds. P.J.M.Bartos, D.L.Marrs y D.J.Cleand, E&FN Spon, Londres, pp. 483-492.

**Sedran, T., De Larrard, F., Hourst, F. y Contamines, C. (1996),** Mix Design of Self-Compacting Concrete. Production Methods and Workability of Concrete, Eds. P.J.M.Bartos, D.L.Marrs y D.J.Cleand, E&FN Spon, Londres, pp. 439-450.

**SKARENDAHL, A. y PETERSSON, O. (2000).** Self - Compacting Concrete, State - of the -Art. Report of RILEM TC 174 - SCC, Report 23, RILEM publications S.A.R.L., Cachan, Francia, 154p.

**Solas y Giani (2010)** Tecnología del hormigón avanzada

**Song, (2001).** Early-age creep and shrinkage in self-compacting concrete incorporating GGBFS," Proceedings of the Second International Symposium on SCC, pp. 413-21.

**Videla & Aguilar (2005).** Estudio del Comportamiento y desarrollo de una metodología de predicción de la retracción hidráulica de hormigones. Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

**Walraven, J. (2001),** State of the Art of Self Compacting Concrete in TheNetherlands. Proc. Second Intl. Symp. on Self CompactingConcrete (Tokyo), Eds. K.Ozawa y M.Ouchi, COMS Engineering Corp., Kochi, Japón, pp. 13-24.

**Ye., G., Liu, X., De Schutter, G., Taerwe, L., Yuan, Y., (2005).** The microstructure of SCC compared with high performance concrete and traditional concrete. First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, RILEM Proceedings PRO 42, pp. 383-394.

## 7.- ANEXOS.

### 7.1 Tabla Lecturas de Peso (Grs).

		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
<b>AP</b>														
<b>Hormigón Patron</b>	r1	3694	3626	3602	3573	3548	3530	3523	3520	3514	3512	3506	3502	3493
	r2	3709	3650	3595	3566	3559	3543	3539	3536	3530	3523	3514	3508	3499
	r3	3701	3637	3611	3595	3577	3570	3557	3549	3545	3533	3525	3519	3511
<b>A2</b>														
<b>Hormigón con reemplazo 20% escoria</b>	r1	3995	3961	3942	3924	3905	3880	3869	3855	3842	3833	3828	3825	3814
	r2	3712	3671	3641	3615	3600	3589	3574	3569	3563	3552	3548	3544	3538
	r3	3668	3624	3595	3582	3565	3545	3532	3518	3511	3501	3498	3492	3481
<b>A4</b>														
<b>Hormigón con reemplazo 60% escoria</b>	r1	3930	3889	3850	3832	3820	3800	3789	3777	3768	3756	3751	3745	3734
	r2	3987	3941	3922	3904	3886	3874	3862	3850	3844	3838	3833	3830	3818
	r3	3879	3835	3820	3802	3791	3780	3771	3766	3760	3765	3763	3759	3746
<b>A5</b>														
<b>Hormigón con reemplazo 20% Vidrio</b>	r1	3582	3539	3502	3478	3468	3450	3440	3436	3429	3424	3420	3417	3408
	r2	3593	3550	3515	3488	3473	3463	3455	3450	3444	3440	3432	3430	3420
	r3	3553	3503	3471	3450	3438	3426	3417	3413	3408	3398	3394	3389	3380
<b>A7</b>														
<b>Hormigón con reemplazo 60% Vidrio</b>	r1	3676	3599	3575	3539	3508	3493	3485	3480	3475	3469	3464	3461	3450
	r2	3556	3512	3486	3455	3434	3417	3410	3404	3397	3391	3386	3383	3375
	r3	3589	3546	3507	3496	3489	3475	3465	3458	3452	3445	3440	3437	3428
<b>A8</b>														
<b>Hormigón con adición de fibra 600 gr/m3</b>	r1	3685	3643	3598	3572	3564	3552	3543	3537	3532	3521	3517	3514	3500
	r2	3707	3654	3622	3605	3585	3572	3566	3560	3557	3545	3542	3538	3528
	r3	3727	3664	3636	3612	3583	3570	3559	3557	3553	3562	3558	3551	3539
<b>A9</b>														
<b>Hormigón con adición de fibra 900 gr/m3</b>	r1	3693	3640	3605	3580	3574	3563	3554	3535	3530	3524	3521	3518	3509
	r2	3697	3645	3607	3586	3570	3552	3548	3544	3539	3529	3524	3520	3512
	r3	3699	3639	3611	3595	3576	3563	3549	3547	3541	3539	3537	3535	3527
		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90

## 7.2 Tabla Lecturas Promedio de Peso (Grs).

PERDIDA DE PESO (grs)														
	%	0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
H.patrn	-	3.701	3.638	3.603	3.578	3.561	3.548	3.540	3.535	3.530	3.523	3.515	3.510	3.501
H. con Escoria de cobre	20	3.792	3.752	3.726	3.707	3.690	3.671	3.658	3.647	3.639	3.628	3.625	3.620	3.611
H. con Escoria de cobre	60	3.932	3.888	3.864	3.846	3.832	3.818	3.807	3.798	3.791	3.786	3.782	3.778	3.766
H. con Vidrio	20	3.576	3.531	3.496	3.472	3.460	3.446	3.437	3.433	3.427	3.421	3.416	3.412	3.403
H. con Vidrio	60	3.607	3.552	3.523	3.497	3.477	3.462	3.453	3.447	3.441	3.435	3.430	3.427	3.418
H. con Fibras	600 gr/m3	3.706	3.654	3.619	3.596	3.577	3.565	3.556	3.551	3.547	3.543	3.539	3.534	3.522
H. con Fibras	900 gr/m3	3.696	3.641	3.608	3.587	3.573	3.559	3.550	3.542	3.537	3.530	3.527	3.524	3.516

## 7.3 Tabla Lecturas diferencia de Peso (Grs).

PERDIDA DE PESO (grs)														
	%	0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
H.patrn	-	0	-64	-35	-25	-17	-14	-8	-5	-5	-7	-8	-5	-9
H. con Escoria de cobre	20	0	-40	-26	-19	-17	-19	-13	-11	-9	-10	-4	-4	-9
H. con Escoria de cobre	60	0	-44	-24	-18	-14	-14	-11	-10	-7	-4	-4	-4	-12
H. con Vidrio	20	0	-45	-35	-24	-12	-13	-9	-4	-6	-6	-5	-3	-10
H. con Vidrio	60	0	-55	-30	-26	-20	-15	-8	-6	-6	-6	-5	-3	-9
H. con Fibras	600 gr/m3	0	-53	-35	-22	-19	-13	-9	-5	-4	-5	-4	-5	-12
H. con Fibras	900 gr/m3	0	-55	-34	-21	-14	-14	-9	-8	-5	-6	-3	-3	-8

## 7.4 Tabla Lecturas de Peso en Porcentaje (%).

PERDIDA DE PESO EN PORCENTAJE														
	%	0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
H.patrn	-	0,00	1,75	0,97	0,69	0,47	0,39	0,23	0,13	0,15	0,20	0,22	0,15	0,25
H. con Escoria de cobre	20	0,00	1,06	0,70	0,51	0,46	0,51	0,36	0,30	0,24	0,28	0,10	0,12	0,26
H. con Escoria de cobre	60	0,00	1,12	0,63	0,47	0,36	0,38	0,28	0,25	0,18	0,12	0,11	0,11	0,32
H. con Vidrio	20	0,00	1,28	0,99	0,69	0,36	0,39	0,26	0,13	0,18	0,19	0,15	0,10	0,28
H. con Vidrio	60	0,00	1,54	0,84	0,74	0,57	0,44	0,24	0,17	0,17	0,18	0,15	0,08	0,28
H. con Fibras	600 gr/m3	0,00	1,44	0,97	0,62	0,53	0,36	0,24	0,13	0,11	0,13	0,11	0,13	0,33
H. con Fibras	900 gr/m3	0,00	1,51	0,93	0,58	0,38	0,39	0,25	0,24	0,15	0,18	0,09	0,09	0,23

## 7.5 Tabla Lecturas de Peso en Porcentaje Acumulado (%).

PERDIDA DE PESO PORCENTAJE ACUMULADO	%													
		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
H.patrn	-	0,00	1,75	2,72	3,41	3,88	4,26	4,49	4,62	4,77	4,97	5,19	5,34	5,59
H. con Escoria de cobre	20	0,00	1,06	1,76	2,27	2,73	3,24	3,59	3,89	4,13	4,42	4,52	4,64	4,90
H. con Escoria de cobre	60	0,00	1,12	1,75	2,22	2,58	2,95	3,23	3,49	3,67	3,79	3,90	4,01	4,33
H. con Vidrio	20	0,00	1,28	2,28	2,97	3,32	3,71	3,97	4,10	4,27	4,46	4,61	4,71	4,99
H. con Vidrio	60	0,00	1,54	2,38	3,12	3,69	4,13	4,37	4,55	4,72	4,91	5,05	5,14	5,41
H. con Fibras	600 gr/m3	0,00	1,44	2,41	3,03	3,56	3,92	4,16	4,29	4,40	4,53	4,65	4,78	5,11
H. con Fibras	900 gr/m3	0,00	1,51	2,44	3,02	3,40	3,80	4,05	4,28	4,44	4,61	4,71	4,79	5,02

## 7.6 Tabla Lecturas de Retracción (mm/m).

	Días	0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
		Li	Lf	4	7	14	21	28	35	42	49	56	63	83
AP	r1	0,2094	0,2517	0,2472	0,2426	0,2397	0,2381	0,2359	0,2344	0,2333	0,2324	0,2313	0,2310	0,2301
	r2	0,1752	0,2160	0,2136	0,2081	0,2048	0,2032	0,2011	0,1983	0,1974	0,1965	0,1954	0,1950	0,1943
	r3	0,2464	0,2863	0,2828	0,2785	0,2758	0,2730	0,2721	0,2676	0,2667	0,2659	0,2646	0,2644	0,2638
A2														
20% Escoria de cobre	r1	0,2243	0,2575	0,2534	0,2523	0,2505	0,2491	0,2459	0,2444	0,2430	0,2419	0,2412	0,2408	0,2403
	r2	0,1915	0,2236	0,2199	0,2183	0,2165	0,2147	0,2118	0,2102	0,2086	0,2077	0,2073	0,2071	0,2066
	r3	0,2656	0,3029	0,2997	0,2980	0,2951	0,2937	0,2900	0,2885	0,2871	0,2859	0,2851	0,2850	0,2845
A4														
60% Escoria de cobre	r1	0,1377	0,1692	0,1648	0,1620	0,1602	0,1588	0,1543	0,1534	0,1528	0,1514	0,1507	0,1507	0,1504
	r2	0,0557	0,0853	0,0821	0,0792	0,0774	0,0767	0,0731	0,0720	0,0709	0,0700	0,0696	0,0696	0,0692
	r3	0,1151	0,1494	0,1455	0,1426	0,1405	0,1369	0,1344	0,1333	0,1322	0,1314	0,1311	0,1309	0,1306
A5														
20% Vidrio	r1	0,1423	0,1652	0,1595	0,1562	0,1521	0,1517	0,1494	0,1469	0,1454	0,1445	0,1437	0,1431	0,1418
	r2	0,1605	0,1819	0,1758	0,1715	0,1704	0,1674	0,1652	0,1634	0,1622	0,1615	0,1607	0,1600	0,1588
	r3	0,1890	0,2047	0,1993	0,1945	0,1916	0,1897	0,1892	0,1854	0,1841	0,1831	0,1823	0,1819	0,1807
A7														
60% Vidrio	r1	0,1782	0,1975	0,1898	0,1856	0,1826	0,1805	0,1795	0,1774	0,1758	0,1746	0,1736	0,1731	0,1721
	r2	0,0822	0,1007	0,0934	0,0877	0,0863	0,0833	0,0824	0,0815	0,0803	0,0791	0,0784	0,0779	0,0768
	r3	0,1498	0,1687	0,1608	0,1557	0,1525	0,1505	0,1486	0,1468	0,1455	0,1442	0,1435	0,1435	0,1423
A8														
600 gr/m3 Fibra de polipropileno	r1	0,1765	0,1987	0,1955	0,1941	0,1922	0,1909	0,1866	0,1855	0,1846	0,1836	0,1832	0,1829	0,1824
	r2	0,1744	0,1973	0,1947	0,1932	0,1911	0,1898	0,1858	0,1850	0,1835	0,1828	0,1823	0,1821	0,1817
	r3	0,1005	0,1222	0,1199	0,1184	0,1168	0,1160	0,1118	0,1106	0,1096	0,1090	0,1087	0,1085	0,1079
A9														
900 gr/m3 Fibra de polipropileno	r1	0,1568	0,1821	0,1813	0,1808	0,1793	0,1771	0,1731	0,1725	0,1714	0,1711	0,1710	0,1707	0,1700
	r2	0,1544	0,1791	0,1786	0,1781	0,1767	0,1747	0,1707	0,1698	0,1692	0,1687	0,1685	0,1683	0,1677
	r3	0,1194	0,1406	0,1385	0,1375	0,1360	0,1332	0,1303	0,1300	0,1295	0,1288	0,1285	0,1280	0,1275
		Li	Lf	4	7	14	21	28	35	42	49	56	63	90

## 7.7 Tabla Diferencias Lectura de Retracción (mm/m).

Diferencia de retracción		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
AP	r1	0,0000	0,0423	-0,0045	-0,0046	-0,0029	-0,0016	-0,0022	-0,0015	-0,0011	-0,0009	-0,0011	-0,0003	-0,0009
	r2	0,0000	0,0408	-0,0024	-0,0055	-0,0033	-0,0016	-0,0021	-0,0028	-0,0009	-0,0009	-0,0011	-0,0004	-0,0007
	r3	0,0000	0,0399	-0,0035	-0,0043	-0,0027	-0,0028	-0,0009	-0,0045	-0,0009	-0,0008	-0,0013	-0,0002	-0,0006
A2	r1	0,0000	0,0332	-0,0041	-0,0011	-0,0018	-0,0014	-0,0032	-0,0015	-0,0014	-0,0011	-0,0007	-0,0004	-0,0005
	r2	0,0000	0,0321	-0,0037	-0,0016	-0,0018	-0,0018	-0,0029	-0,0016	-0,0016	-0,0009	-0,0004	-0,0002	-0,0005
	r3	0,0000	0,0373	-0,0032	-0,0017	-0,0029	-0,0014	-0,0037	-0,0015	-0,0014	-0,0012	-0,0008	-0,0001	-0,0005
A4	r1	0,0000	0,0315	-0,0044	-0,0028	-0,0018	-0,0014	-0,0045	-0,0009	-0,0006	-0,0014	-0,0007	0,0000	-0,0003
	r2	0,0000	0,0296	-0,0032	-0,0029	-0,0018	-0,0007	-0,0036	-0,0011	-0,0011	-0,0009	-0,0004	0,0000	-0,0004
	r3	0,0000	0,0343	-0,0039	-0,0029	-0,0021	-0,0036	-0,0025	-0,0011	-0,0011	-0,0008	-0,0003	-0,0002	-0,0003
A5	r1	0,0000	0,0229	-0,0057	-0,0033	-0,0041	-0,0004	-0,0023	-0,0025	-0,0015	-0,0009	-0,0008	-0,0006	-0,0013
	r2	0,0000	0,0214	-0,0061	-0,0043	-0,0011	-0,0030	-0,0022	-0,0018	-0,0012	-0,0007	-0,0008	-0,0007	-0,0012
	r3	0,0000	0,0157	-0,0054	-0,0048	-0,0029	-0,0019	-0,0005	-0,0038	-0,0013	-0,0010	-0,0008	-0,0004	-0,0012
A7	r1	0,0000	0,0193	-0,0077	-0,0042	-0,0030	-0,0021	-0,0010	-0,0021	-0,0016	-0,0012	-0,0010	-0,0005	-0,0010
	r2	0,0000	0,0185	-0,0073	-0,0057	-0,0014	-0,0030	-0,0009	-0,0009	-0,0012	-0,0012	-0,0007	-0,0005	-0,0011
	r3	0,0000	0,0189	-0,0079	-0,0051	-0,0032	-0,0020	-0,0019	-0,0018	-0,0013	-0,0013	-0,0007	0,0000	-0,0012
A8	r1	0,0000	0,0222	-0,0032	-0,0014	-0,0019	-0,0013	-0,0043	-0,0011	-0,0009	-0,0010	-0,0004	-0,0003	-0,0005
	r2	0,0000	0,0229	-0,0026	-0,0015	-0,0021	-0,0013	-0,0040	-0,0008	-0,0015	-0,0007	-0,0005	-0,0002	-0,0004
	r3	0,0000	0,0217	-0,0023	-0,0015	-0,0016	-0,0008	-0,0042	-0,0012	-0,0010	-0,0006	-0,0003	-0,0002	-0,0006
A9	r1	0,0000	0,0253	-0,0008	-0,0005	-0,0015	-0,0022	-0,0040	-0,0006	-0,0011	-0,0003	-0,0001	-0,0003	-0,0007
	r2	0,0000	0,0247	-0,0005	-0,0005	-0,0014	-0,0020	-0,0040	-0,0009	-0,0006	-0,0005	-0,0002	-0,0002	-0,0006
	r3	0,0000	0,0212	-0,0021	-0,0010	-0,0015	-0,0028	-0,0029	-0,0003	-0,0005	-0,0007	-0,0003	-0,0005	-0,0005
		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90

## 7.8 Tabla Diferencias Lectura Promedio de Retracción (mm/m).

Retracción	%	EXPANSIÓN		RETRACCIÓN HIDRAULICA										
		HIDRAULICA (mm/m)		Edad del hormigón autocompactante (días)										
		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
Hormigón Patrón	-	0,0000	0,0410	-0,0035	-0,0048	-0,0030	-0,0020	-0,0017	-0,0029	-0,0010	-0,0009	-0,0012	-0,0003	-0,0007
H. con Escoria de Cobre	20	0,0000	0,0342	-0,0037	-0,0015	-0,0022	-0,0015	-0,0033	-0,0015	-0,0015	-0,0011	-0,0006	-0,0002	-0,0005
H. con Escoria de Cobre	60	0,0000	0,0318	-0,0038	-0,0029	-0,0019	-0,0019	-0,0035	-0,0010	-0,0009	-0,0010	-0,0005	-0,0001	-0,0003
H. con Vidrio	20	0,0000	0,0200	-0,0057	-0,0041	-0,0027	-0,0018	-0,0017	-0,0027	-0,0013	-0,0009	-0,0008	-0,0006	-0,0012
H. con Vidrio	60	0,0000	0,0189	-0,0076	-0,0050	-0,0025	-0,0024	-0,0013	-0,0016	-0,0014	-0,0012	-0,0008	-0,0003	-0,0011
H. con Fibras	600 gr/m3	0,0000	0,0223	-0,0027	-0,0015	-0,0019	-0,0011	-0,0042	-0,0010	-0,0011	-0,0008	-0,0004	-0,0002	-0,0005
H. con Fibras	900gr/m3	0,0000	0,0237	-0,0011	-0,0007	-0,0015	-0,0023	-0,0036	-0,0006	-0,0007	-0,0005	-0,0002	-0,0003	-0,0006

## 7.9 Tabla Lectura de Retracción Acumulado (mm/m).

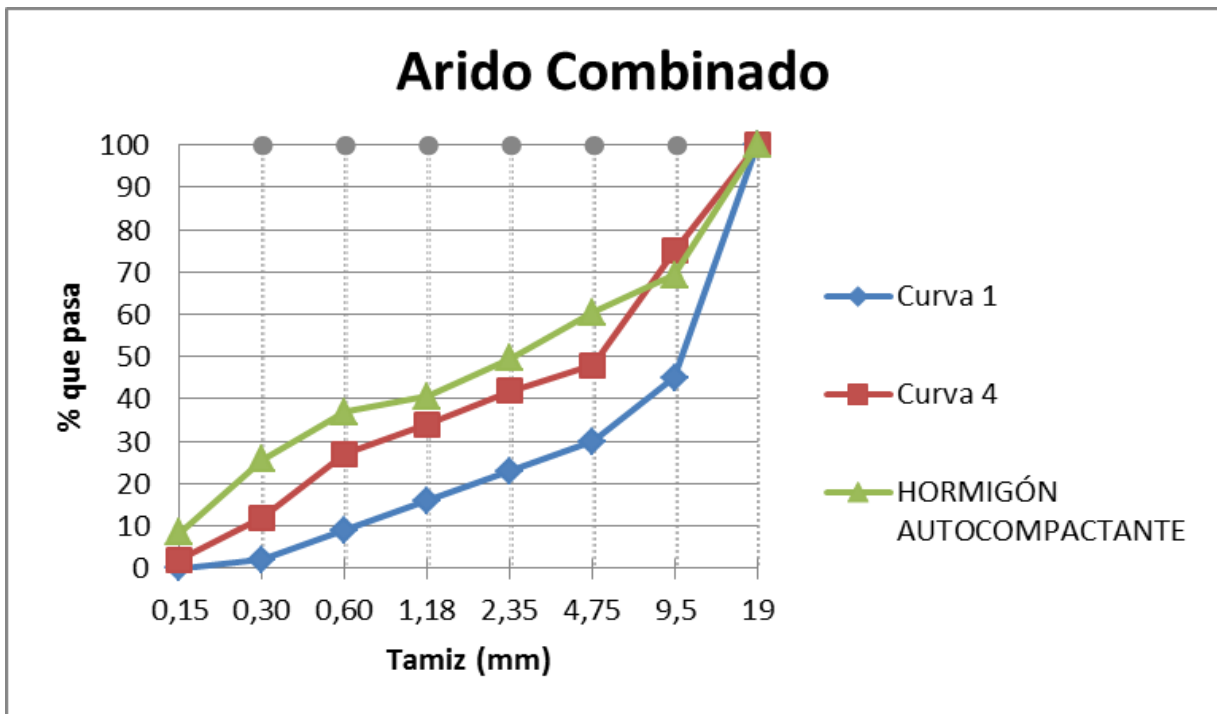
Retracción mm/m Acumulado	%	EXPANSIÓN		RETRACCIÓN HIDRAULICA (mm/m)										
		HIDRAULICA (mm/m)		Edad del hormigón autocompactante (días)										
		0	7	11	14	21	28	35	42	49	56	63	70	90
Hormigón Patrón	-	0,0000	0,0410	-0,0035	-0,0083	-0,0112	-0,0132	-0,0150	-0,0179	-0,0189	-0,0197	-0,0209	-0,0212	-0,0219
H. con Escoria de Cobre	20	0,0000	0,0342	-0,0037	-0,0051	-0,0073	-0,0088	-0,0121	-0,0136	-0,0151	-0,0162	-0,0168	-0,0170	-0,0175
H. con Escoria de Cobre	60	0,0000	0,0318	-0,0038	-0,0067	-0,0086	-0,0105	-0,0140	-0,0151	-0,0160	-0,0170	-0,0175	-0,0176	-0,0179
H. con Vidrio	20	0,0000	0,0200	-0,0057	-0,0099	-0,0126	-0,0143	-0,0160	-0,0187	-0,0200	-0,0209	-0,0217	-0,0223	-0,0235
H. con Vidrio	60	0,0000	0,0189	-0,0076	-0,0126	-0,0152	-0,0175	-0,0188	-0,0204	-0,0218	-0,0230	-0,0238	-0,0241	-0,0252
H. con Fibras	600 gr/m3	0,0000	0,0223	-0,0027	-0,0042	-0,0060	-0,0072	-0,0113	-0,0124	-0,0135	-0,0143	-0,0147	-0,0149	-0,0154
H. con Fibras	900gr/m3	0,0000	0,0237	-0,0011	-0,0018	-0,0033	-0,0056	-0,0092	-0,0098	-0,0106	-0,0111	-0,0113	-0,0116	-0,0122

## 7.10 Tabla Resistencia a compresión.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN		KN	Factor	Mpa	Mpa corregido	Kgf/cm2
AP	C1	786730	0,95	34,566	33	334,85
	C2	790540	0,95	34,635	33	335,52
	C3	727004	0,95	32,311	31	313,01
A2	C1	763802	0,95	33,947	32	328,86
	C2	770630	0,95	34,25	33	331,79
	C3	753884	0,95	33,506	32	324,58
A4	C1	777171	0,95	34,541	33	334,61
	C2	757118	0,95	33,65	32	325,98
	C3	800386	0,95	35,573	34	344,61
A5	C1	734695	0,95	32,653	31	316,32
	C2	779612	0,95	33,899	32	328,39
	C3	775806	0,95	34,48	33	334,02
A7	C1	728441	0,95	32,375	31	313,63
	C2	705801	0,95	31,369	30	303,88
	C3	723985	0,95	32,177	31	311,71
A8	C1	726929	0,95	32,308	31	312,98
	C2	783353	0,95	34,816	33	337,27
	C3	783784	0,95	34,835	33	337,46
A9	C1	740948	0,95	32,931	31	319,01
	C2	766172	0,95	34,052	32	329,87
	C3	783497	0,95	34,822	33	337,33

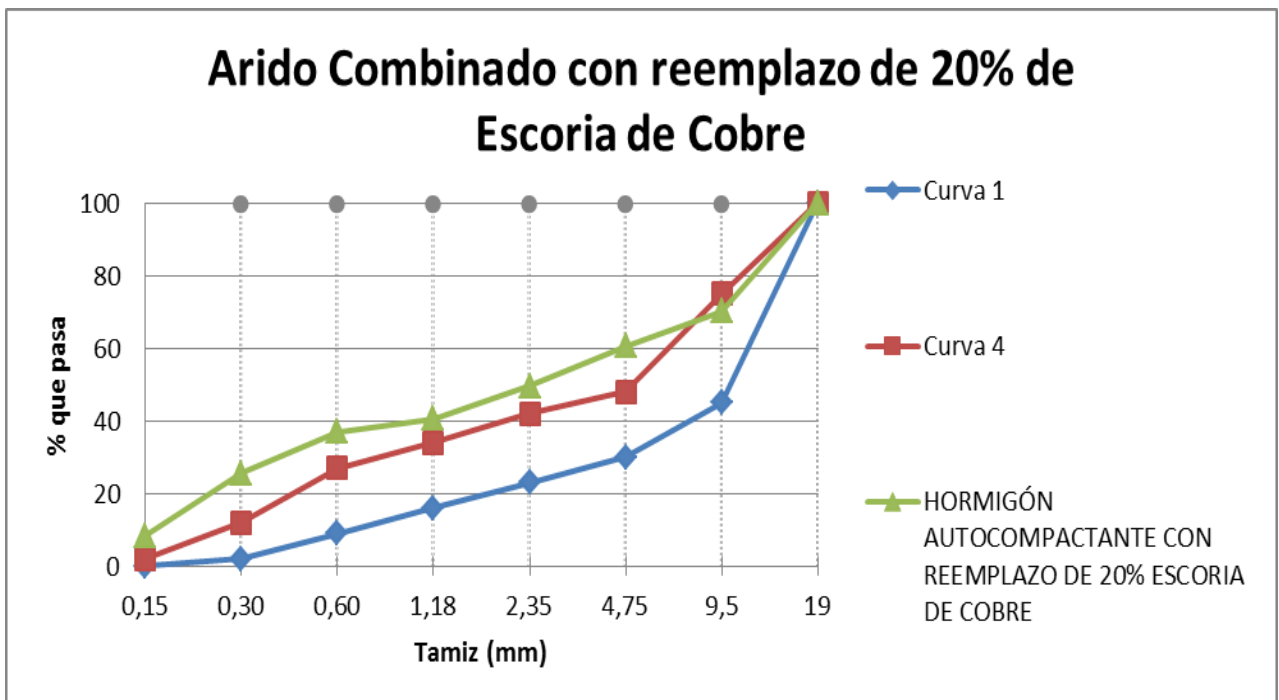
## 7.11 Tabla Árido Combinado Hormigón Patrón.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE								
Prop. en PESO supuesta	Grueso	Fino	Filler	Árido Combinado Banda Granulométrica				Mezcla tanteo 40-50-10
Tamiz (mm)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa				% pasa peso
				Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	
19	100	100	100	100	100	100	100	100
9,5	23	100	100	45	55	65	75	69
4,75	1	100	100	30	35	42	48	61
2,35	1	79	100	23	28	35	42	50
1,18	0	61	100	16	21	28	34	41
0,60	0	54	100	9	14	21	27	37
0,30	0	31	100	2	3	5	12	26
0,15	0	7	47	0	0	0	2	8
TANTEO	0,4	0,5	0,1					



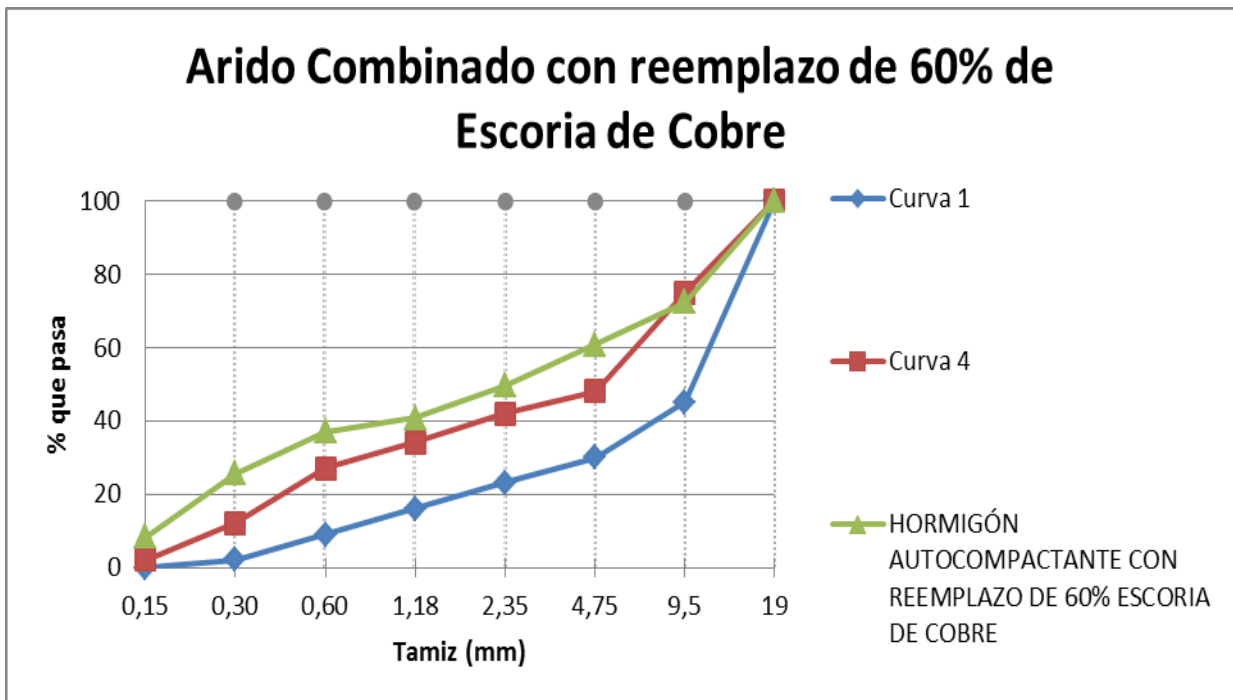
## 7.12 Tabla Árido Combinado Hormigón 20% Escoria.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON REEMPLAZO DE 20% ESCORIA DE COBRE									
Prop. en PESO supuesta	Escoria de cobre	Grueso	Fino	Filler	Árido Combinado Banda Granulométrica				Mezcla tanteo 1
Tamiz (mm)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa				% pasa peso
					Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	
19	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100
9,5	36	23	100	100	45	55	65	75	70
4,75	3	1	100	100	30	35	42	48	61
2,35	0	1	79	100	23	28	35	42	50
1,18	0	0	61	100	16	21	28	34	41
0,60	0	0	54	100	9	14	21	27	37
0,30	0	0	31	100	2	3	5	12	26
0,15	0	0	7	47	0	0	0	2	8
TANTEO	0,08	0,32	0,5	0,1					



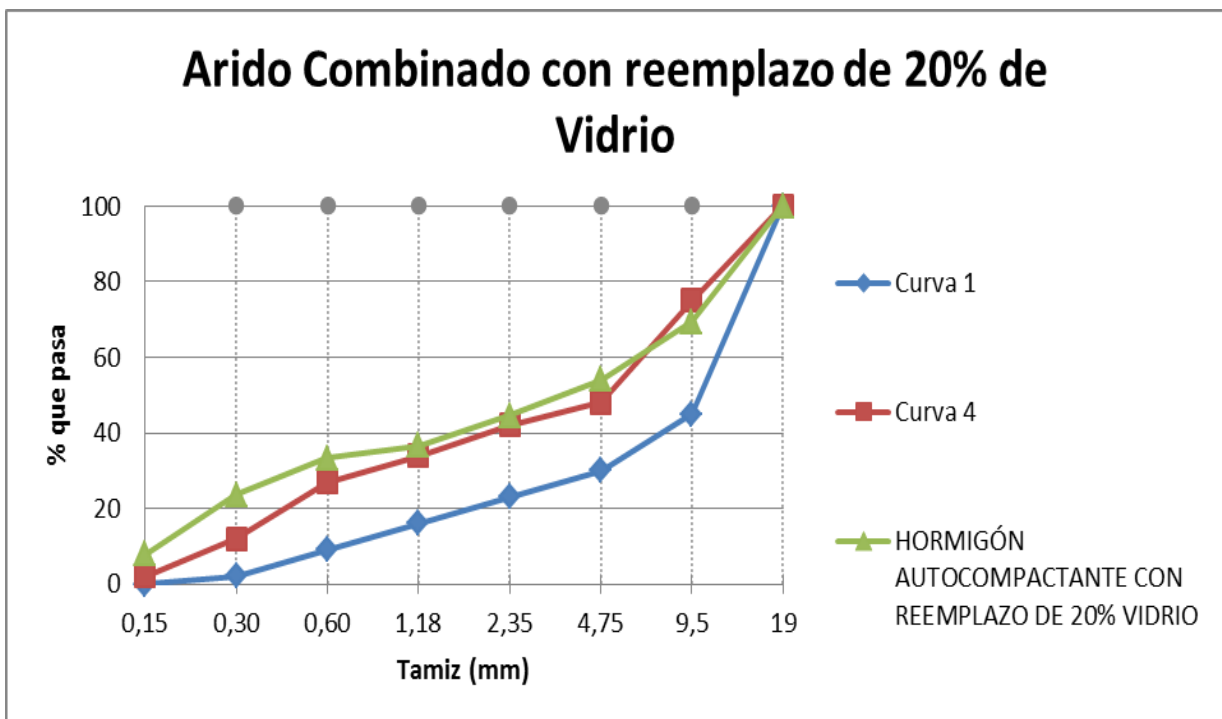
## 7.13 Tabla Árido Combinado Hormigón 60% Escoria.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON REEMPLAZO DE 60% ESCORIA DE COBRE									
Prop. en PESO supuesta	Escoria de cobre	Grueso	Fino	Filler	Árido Combinado Banda Granulométrica				Mezcla tanteo 1
Tamiz (mm)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa				% pasa peso
					Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	
19	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100
9,5	36	23	100	100	45	55	65	75	72
4,75	3	1	100	100	30	35	42	48	61
2,35	0	1	79	100	23	28	35	42	50
1,18	0	0	61	100	16	21	28	34	41
0,60	0	0	54	100	9	14	21	27	37
0,30	0	0	31	100	2	3	5	12	26
0,15	0	0	7	47	0	0	0	2	8
TANTEO	0,24	0,16	0,5	0,1					



## 7.14 Tabla Árido Combinado Hormigón 20% Vidrio.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON REEMPLAZO DE 20% VIDRIO									
Prop. en PESO supuesta	Grueso	Fino	Vidrio	Filler	Árido Combinado Banda Granulométrica				Mezcla tanteo 1
Tamiz (mm)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa				% pasa peso
					Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	
19	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9,5	23	100	100	100	45	55	65	75	69
4,75	1	100	35	100	30	35	42	48	54
2,35	1	79	27	100	23	28	35	42	45
1,18	0	61	21	100	16	21	28	34	37
0,60	0	54	18	100	9	14	21	27	33
0,30	0	31	11	100	2	3	5	12	24
0,15	0	7	3	47	0	0	0	2	8
TANTEO	0,4	0,4	0,1	0,1					



## 7.15 Tabla Árido Combinado Hormigón 60% Vidrio.

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON REEMPLAZO DE 60% VIDRIO									
Prop. en PESO supuesta	Grueso	Fino	Vidrio	Filler	Árido Combinado Banda Granulométrica				Mezcla tanteo 40-20-30-10
Tamiz (mm)	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa				% pasa peso
					Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	
19	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9,5	23	100	100	100	45	55	65	75	69
4,75	1	100	35	100	30	35	42	48	41
2,35	1	79	27	100	23	28	35	42	34
1,18	0	61	21	100	16	21	28	34	29
0,60	0	54	18	100	9	14	21	27	26
0,30	0	31	11	100	2	3	5	12	19
0,15	0	7	3	47	0	0	0	2	7
TANTEO	0,4	0,2	0,3	0,1					

