



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON  
FIBRAS SINTÉTICAS PARA USO ESTRUCTURAL**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**ALAN MICHAEL RABY SANDOVAL**

**PROFESOR GUÍA:**

JACQUES BORNAND ARAYA

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

DAVID CAMPUSANO BROWN

DAVID SILVA SAAVEDRA

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: ALAN RABY SANDOVAL  
FECHA: 23/11/2016  
PROFESOR GUÍA: JACQUES BORNAND A.

## “CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS SINTÉTICAS PARA USO ESTRUCTURAL”

El hormigón autocompactante es un hormigón que debido a sus propiedades reológicas no requiere de energía externa para su compactación, por otro lado, el hormigón reforzado con fibras es un hormigón al cual se le añaden fibras al momento de confeccionarlo, que pueden ser de distinta materialidad, y que son capaces de mejorar algunas propiedades mecánicas del hormigón, sobre todo en estado post-fisuración.

Este trabajo tuvo como objetivo: (a) evaluar la factibilidad de confeccionar hormigones reforzados con dos tipos fibras sintéticas con características autocompactantes, (b) caracterizar las propiedades mecánicas de estos hormigones y (c) estudiar los potenciales usos que se les pueden dar a este tipo de hormigón.

La metodología contempla un estudio de dosificaciones tanto de aditivos como de dosis de fibras, luego la confección de probetas para ensayos de resistencia a compresión y a flexotracción (resistencia residual) y finalmente un análisis de los resultados obtenidos en ellos.

Como resultado, se obtuvieron mezclas de hormigón con propiedades autocompactantes, condicionando la dosis de fibra añadida a un máximo de  $4\text{kg/m}^3$ . Respecto a las propiedades mecánicas, la incorporación de fibras aumentó la resistencia del hormigón tanto en el rango elástico como post-fisuración, además de incrementar su capacidad de absorber energía y de tolerar deformaciones.

Los potenciales usos de estos hormigones abarcan la confección de diversos tipos de elementos que requieren de una mezcla autocompactante, por la forma que poseen y/o por presentar elevadas cuantías de armadura, y que además requieran aumentar su desempeño estructural incorporándole fibras. Así también, en elementos que posean bajas cuantías podría evaluarse el reemplazo total de armaduras por fibras y en el caso de altas cuantías, las fibras podrían reemplazar parcialmente las armaduras de refuerzo.

## Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodología .....	3
1.3.1. Recopilación de antecedentes y métodos de estudio .....	3
1.3.2. Plan experimental .....	3
1.3.3. Estudio de resultados .....	3
1.4. Alcance .....	4
Capítulo 2. Marco teórico .....	5
2.1. Hormigón Autocompactante .....	5
2.2. Hormigones Reforzados con Fibras .....	6
2.2.1. Caracterización de fibras .....	6
2.2.2. Mecanismo de las fibras .....	8
2.3. Influencia de las fibras sobre el HAC .....	9
2.4. Aplicaciones .....	10
2.4.1. HAC .....	10
2.4.2. HRF .....	10
2.5. Normativa y Ensayos .....	10
2.5.1. Ensayos en estado fresco .....	11
2.5.1.1. Ensayo de escurrimiento .....	12
2.5.1.2. Ensayo del embudo en V .....	13
2.5.1.3. Ensayo de la caja L .....	14
2.5.2. Ensayos en estado endurecido .....	15
2.5.2.1. Ensayo de resistencia a flexotracción (resistencia residual) ...	17
2.5.2.2. Ensayo de compresión de probetas cúbicas .....	20
Capítulo 3. Materiales .....	23
3.1. Cemento .....	23
3.2. Áridos .....	24
3.3. Fibras .....	26
3.4. Aditivos .....	28
3.4.1. Plastificante (Plastocrete 1390) .....	28

3.4.2. Superplastificantes .....	29
3.4.2.1. Viscocrete 5100 .....	29
3.4.2.2. Masterglenium 1305.....	29
3.4.3. Modulador de viscosidad (Walocel) .....	29
Capítulo 4. Programa Experimental y Resultados.....	30
4.1. Estudio de dosificación.....	30
4.2. Límite máximo de contenido de fibra.....	31
4.3. Hormigones de prueba.....	32
4.4. Resultados de ensayos en estado fresco.....	33
4.5. Resultados de ensayos en estado endurecido.....	35
4.5.1. Ensayos de resistencia a compresión .....	35
4.5.2. Resultados de ensayos de resistencia a flexotracción . .....	37
4.6. Distribución de fibras.....	45
Capítulo 5. Análisis de Resultados.....	50
5.1. Análisis de resultados obtenidos en laboratorio .....	50
5.2. Tenacidad .....	57
5.3. Función estructural de las fibras en el hormigón.....	58
5.4. Potenciales aplicaciones.....	60
Capítulo 6. Conclusiones .....	61
Bibliografía .....	63

## Índice de figuras

Figura 1. Macrofibras de distinta materialidad y geometría (7).....	7
Figura 2. Curvas típicas Carga-Deformación en hormigón reforzado con fibras (3).....	8
Figura 3. Curvas carga-desplazamiento para distintos comportamientos de HRF (26). ..	9
Figura 5. Cono de Abrams (10). .....	12
Figura 4. Esquema y dimensiones placa para ensayo de escurrimiento (10). .....	12
Figura 6. Esquema y dimensiones Embudo en V (10). .....	13
Figura 7. Dimensiones y características de la Caja L (10). .....	15
Figura 8. Configuración para ensayo EN 14651 (24). .....	17
Figura 9. Curva carga-CMOD tipo del ensayo EN 14651.....	20
Figura 10. Esquema probeta cúbica para ensayo de resistencia a compresión.....	21
Figura 11. Curva Granulométrica áridos. ....	25
Figura 12. Vista de cerca de las fibras. ....	27
Figura 13. Imagen de las dos fibras utilizadas en este estudio Barchip 48 (izquierda) y Barchip Dúctil 57 (derecha). .....	28
Figura 15. Ensayo de escurrimiento.....	35
Figura 14. Ensayo de Caja L.....	35
Figura 16. Gráfico con promedios de resistencia a compresión a 7 y 28 días. ....	36
Figura 17. Curvas esfuerzo-deformación H-Control (sin fibras). ....	37
Figura 18. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B48-4. ....	38
Figura 19. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B48-6. ....	39
Figura 20. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B48-8. ....	40
Figura 21. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B-57-4.....	41
Figura 22. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B57-6. ....	42
Figura 23. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B57-8. ....	43
Figura 24. Configuración ensayo de resistencia a flexión EN 14651 (24) y prensa utilizada para realizar los ensayos de resistencia a flexotracción y resistencia residual. ....	44
Figura 25. Distribución de fibras tipo hormigón H-B48-4.....	45
Figura 26. Distribución de fibras tipo hormigón H-B48-6.....	46
Figura 27. Distribución de fibras probeta n° 2 hormigón H-B48. ....	46
Figura 28. Distribución de fibras tipo hormigón H-B48-8.....	47
Figura 29. Distribución de fibras tipo hormigón H-B57-4.....	47
Figura 30. Distribución de fibras tipo hormigón H-B57-6.....	48
Figura 31. Distribución de fibras tipo hormigón H-B57-8.....	48
Figura 32. Curvas esfuerzo-deformación de los 7 hormigones confeccionados. ....	51
Figura 33. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con fibra Barchip 48 y H-Control.....	52
Figura 34. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con fibra Barchip Dúctil 57 y H-Control. ....	53

Figura 35. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con 4 kg/m <sup>3</sup> de fibra y H-Control. ....	54
Figura 36. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con 6 kg/m <sup>3</sup> de fibra y H-Control. ....	55
Figura 37. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con 8 kg/m <sup>3</sup> de fibra y H-Control. ....	56
Figura 38. Curvas de tenacidad (energía-deformación) de los 7 hormigones confeccionados. ....	57

### Índice de tablas

Tabla 1. Principales ensayos para evaluar las propiedades en estado fresco de HAC (10). ....	11
Tabla 2. Principales ensayos para evaluar la resistencia a flexión de HRF (11). ....	16
Tabla 3. Resistencias a tracción por flexión a las deformaciones más significativas. ....	19
Tabla 4. Resultados de ensayos realizados a cemento Melón Extra. ....	23
Tabla 5. Principales características de la arena. ....	26
Tabla 6.- Principales características de las fibras. ....	27
Tabla 7. Primera dosificación. ....	30
Tabla 8. Resultados ensayo Caja L primera dosificación. ....	31
Tabla 9. Dosificación base. ....	32
Tabla 10. Dosificaciones para la confección de los hormigones definitivos. ....	33
Tabla 11. Resultados de ensayos en estado fresco. ....	34
Tabla 12. Resultados de resistencia a compresión a 7 días. ....	35
Tabla 13. Resultados de resistencia a compresión a 28 días. ....	36
Tabla 14. Resultados de resistencia a flexión hormigón H-Control (sin fibras). ....	37
Tabla 15. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB48-4. ....	38
Tabla 16. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB48-6. ....	39
Tabla 17. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB48-8. ....	40
Tabla 18. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB57-4. ....	41
Tabla 19. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB57-6. ....	42
Tabla 20. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB57-8. ....	43
Tabla 21. Resultados promedios de resistencia a flexión de los 7 hormigones confeccionados. ....	50
Tabla 22. Porcentajes de resistencia de $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$ respecto del LOP de los 6 hormigones reforzados con fibras. ....	58
Tabla 23. Clasificación de hormigones según MC-2010 (26). ....	59

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en proyectos de ingeniería civil. Su capacidad de ser moldeado junto con sus propiedades mecánicas y de durabilidad lo hacen un material ideal para diversos tipos de estructuras.

Sin embargo, desde sus inicios la industria del hormigón se ha visto en la obligación de innovar y explorar diversos materiales para ser incorporados en las mezclas, como aditivos y adiciones, con el fin de disminuir costos, mejorar sus propiedades y obtener ventajas sobre otros materiales usados en la construcción. En especial se verán en este estudio, mejorar la baja resistencia a tracción que tiene el hormigón y facilitar la compactación, que puede tornarse compleja en elementos con una gran cantidad de armaduras de refuerzo.

El hormigón autocompactante (HAC) nace de la necesidad de tener un hormigón que pueda ser colocado en obra o en elementos prefabricados sin utilizar métodos de compactación. Se define como un hormigón que se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración o algún otro método para esto, además de no presentar segregación, bloqueo de árido grueso, ni exudación. Este hormigón normalmente se logra incorporando aditivos superplastificantes y una mayor cantidad de finos en la mezcla, con el objetivo de aumentar significativamente la docilidad, procurando evitar segregaciones de los materiales constituyentes.

Este hormigón es utilizado en obras de altas prestaciones, en elementos que poseen altas cuantías de armadura y/o formas que dificulten la compactación a través de métodos tradicionales.

Por otro lado, la adición de fibras al hormigón ha tenido un gran desarrollo en los últimos años, debido a las cualidades que le confieren en estado endurecido y post-agrietamiento. Las fibras mejoran la resistencia del hormigón a tracción, flexión, post-fisuramiento y su capacidad de absorber energía, funcionando como agarre entre fisuras, impidiendo que se abran abruptamente una vez que el hormigón ha perdido gran parte de su aporte estructural, y además evitando fisuración por retracción plástica en estado fresco.

Las fibras más usadas en la industria son de acero, de vidrio o sintéticas, siendo estas últimas las que han ganado terreno por sobre las demás, debido a su menor costo, sencilla manufactura, mayor versatilidad en su forma, diámetro y largo y su mejor desempeño como refuerzo para el hormigón. Los principales materiales usados para fibras sintéticas son acrílico, aramid, carbón, polipropileno, polietileno, nylon y poliéster.

El objetivo de este estudio es conocer la factibilidad de confeccionar una mezcla de hormigón reforzado con fibras que conserve las propiedades y características de un hormigón autocompactante. Se analizarán las ventajas que tiene la incorporación de fibras en el comportamiento mecánico del hormigón y la interacción que tienen las fibras con este tipo de hormigones.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo principal de este trabajo de título es la caracterización de hormigones autocompactantes reforzados con diferentes tipos de fibras sintéticas para uso estructural, donde se analizará la interacción que tienen las fibras con este tipo de hormigones.

Se estudiará la factibilidad de confeccionar mezclas de hormigón que posean características autocompactantes reforzados con fibras. Para lo anterior, se realizará un estudio de dosificaciones y materiales disponibles con el objetivo de verificar la factibilidad de combinar las propiedades en estado fresco, típicas de hormigones autocompactantes, en conjunto con la incorporación de fibras.

Finalmente, se estudiarán las propiedades mecánicas de hormigones reforzados con distintos tipos y dosis de fibra sintética, para esto se realizarán ensayos de laboratorio que permitan evaluar el efecto que tienen las fibras en las propiedades antes mencionadas.

### **1.3. Metodología**

La metodología utilizada contempla tres partes principales que se detallan a continuación:

#### **1.3.1. Recopilación de antecedentes y métodos de estudio**

- Recopilación de información y antecedentes respecto a normas, ensayos, materiales, dosificaciones y estudios anteriores de hormigones reforzados con fibras y hormigones autocompactantes.
- Caracterización de las fibras que serán usadas para este estudio.

#### **1.3.2. Plan experimental**

- Estudio de dosificaciones y materiales.
- Confección hormigones de prueba con dos diferentes fibras sintéticas y 3 dosificaciones de cada una.
- Ensayo de hormigones en estado fresco para verificar que éstos posean propiedades autocompactantes.
- Ensayo de probetas para obtener su resistencia a compresión.
- Ensayo de probetas para obtener su resistencia a flexotracción.

#### **1.3.3. Estudio de resultados**

- Análisis de los resultados obtenidos en los ensayos en estado fresco.
- Análisis de las propiedades mecánicas a compresión y flexotracción
- Comparación de resultados de los distintos hormigones confeccionados
- Estudio de posible aplicaciones de las mezclas realizadas.

## **1.4. Alcance**

En este estudio se caracterizarán hormigones autocompactantes reforzados con fibras, usando para esto dos tipos de fibras sintéticas con distintas características geométricas y tres dosificaciones de éstas, lo que junto al hormigón de control (sin fibras) da una cantidad de siete hormigones, que serán analizados y comparados, para conocer su funcionalidad y aplicabilidad. A cada hormigón se le aplicarán ensayos tanto en estado fresco como endurecido, con el objetivo obtener las principales propiedades que caracterizan a los hormigones autocompactantes y los hormigones reforzados con fibras.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1. Hormigón Autocompactante

Los hormigones autocompactantes se definen como aquellos que, modificando las mezclas convencionales y mediante el uso de aditivos y otras adiciones, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de vibración. Es capaz de fluir y llenar completamente moldes, incluso en presencia de gran cantidad de armaduras, manteniendo o mejorando las propiedades mecánicas y de durabilidad respecto a un hormigón convencional (1).

Por otro lado, la eliminación de equipos de vibración mejora el ambiente en obra, reduciendo la exposición de trabajadores a ruidos y vibración, lo que junto a la facilidad de colocación, hacen de este tipo de hormigón un material muy atractivo como reemplazo del convencional para empresas de prefabricado y de construcción (2).

Los componentes del HAC son los mismos que los del hormigón convencional, cemento, áridos, agua y aditivos, aunque las proporciones de estos varían respecto a las habituales, caracterizándose el hormigón autocompactante por poseer una menor o nula cantidad de árido grueso, menor tamaño máximo de árido (25 mm) y mayor cantidad de pasta (cemento y agua). Aditivos superplastificantes junto con las variaciones en la dosificación antes mencionadas son lo esencial para obtener la trabajabilidad y fluidez característica de un autocompactante, logrando además una reducción en la permeabilidad, aumentando la durabilidad de éste. La relación agua/cemento usada en este tipo de hormigones no varía respecto a la de un hormigón convencional, ésta dependerá de la resistencia que se requiera en estado endurecido. Para disminuir el costo también es posible la adición de puzolanas naturales, polvo de piedra caliza y/o ceniza volante.

El HAC posee tres propiedades esenciales básicas (2):

- Fluidez o habilidad de fluir sin ayuda externa y llenar el encofrado
- Resistencia al bloqueo o habilidad de pasar entre barras de armadura
- Estabilidad dinámica y estática, o resistencia a la segregación, que permite alcanzar finalmente una distribución uniforme de árido en toda su masa.

Estas propiedades son fundamentales para que un hormigón sea autocompactante. Pero debido a la alta fluidez de éste no pueden ser usados los métodos convencionales

para obtener sus propiedades en estado fresco. Los ensayos para este tipo de hormigón se verán en el punto 2.5.1.

## **2.2. Hormigones Reforzados con Fibras**

El hormigón se caracteriza generalmente por su resistencia a compresión, ya que comparativamente su resistencia a la tracción es significativamente menor, así como también por su baja ductilidad y resistencia al agrietamiento. Es por esto que el hormigón es generalmente reforzado con armaduras de acero para soportar dichos esfuerzos de tracción, generando un compuesto de gran efectividad y utilidad en la construcción de todo tipo de obras civiles, pero la colocación de estas armaduras puede tornarse engorrosa y complicar la puesta en obra. Para facilitar la puesta en obra es posible incorporar fibras que remplacen parcial o totalmente las armaduras de refuerzo del hormigón (3).

Los HRF están conformados por una matriz de cemento, áridos y agua, a la que se le agrega fibras que pueden ser de distintos tamaños y materiales, además de otros aditivos en caso de ser necesario. Las fibras se distribuyen homogéneamente y se orientan aleatoriamente dentro de la matriz con el objetivo de aumentar las propiedades mecánicas del compuesto. El uso de fibras ha mostrado que se mejora la resistencia a la fractura, resistencia al corte, la ductilidad, la tenacidad, control de fisuras y la resistencia residual post agrietamiento, la resistencia a la fatiga, entre otras, para el hormigón en estado endurecido. En el caso de hormigón fresco, éstas ayudan a disminuir la fisuración del hormigón debido a la retracción plástica (4).

### **2.2.1. Caracterización de fibras**

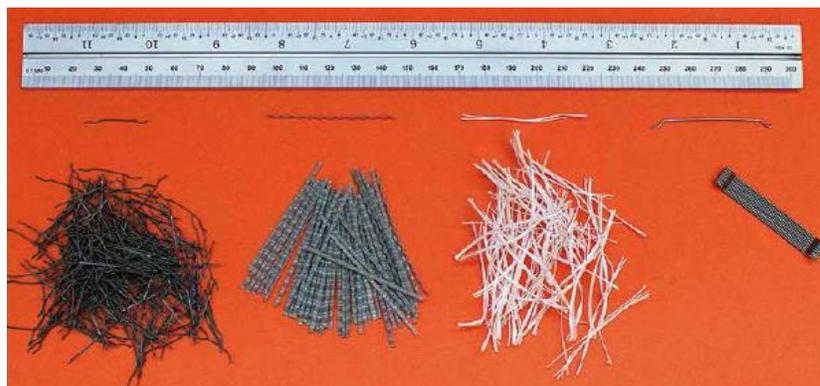
Las fibras que se usan como refuerzo para el hormigón pueden ser de diferentes materiales, dimensiones y propiedades mecánicas. Dentro de los materiales más utilizados se encuentran el acero, la fibra de vidrio, sintéticos y algunos naturales (5).

La norma ASTM C 1116 define las fibras como: “Filamentos finos y alargados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de hormigón fresco”. Esta misma norma clasifica al HRF de acuerdo al material de la fibra utilizada en 3 principales tipos (6):

- Tipo I: Hormigón o Shotcrete reforzado con fibras de acero.
- Tipo II: Hormigón o Shotcrete reforzado con fibras de vidrio.
- Tipo III: Hormigón o Shotcrete reforzado con fibras sintéticas.

Otra manera de clasificar las fibras es de acuerdo a su funcionalidad, existen fibras estructurales y no estructurales. Las estructurales son aquellas que le proporcionan al hormigón un incremento en sus propiedades mecánicas, cuando ya está en estado endurecido, estas fibras se caracterizan por ser de mayor longitud, entre 20 mm y 70 mm, las dosificaciones típicas oscilan entre 2 kg/m<sup>3</sup> y 8 kg/m<sup>3</sup> de hormigón. Las fibras no estructurales tienen como función primaria controlar la fisuración por retracción plástica cuando el hormigón está en estado fresco o antes de las primeras 24 horas, también se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego (altas dosis), son fibras de menor longitud y se usa en dosificaciones bajas, 0,3 kg/m<sup>3</sup> a 1,5 kg/m<sup>3</sup> de hormigón. Debido a la diferencia de longitud entre ambas fibras también se les denomina a las estructurales como macrofibras y a las no estructurales, microfibras (7).

Las principales propiedades de las fibras que se deben tener en cuenta al utilizarlas son: material, longitud ( $l_f$ ), diámetro equivalente ( $d_f$ ), esbeltez o relación aspecto ( $l_f/d_f$ ), forma, superficie, rugosidad, cantidad de fibras (fibras/kg), densidad relativa, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y ductilidad, además de la dosificación. De estas propiedades dependerá el uso que se le dé y el desempeño que tenga el hormigón, asumiendo una correcta confección.



**Figura 1. Macrofibras de distinta materialidad y geometría (7).**

## 2.2.2. Mecanismo de las fibras

Como fue mencionado anteriormente las fibras se distribuyen homogéneamente y se orientan de forma aleatoria dentro de la matriz cementicia, aunque esto dependerá de la manera en que se confeccione el hormigón. En el caso de hormigones autocompactantes las fibras pueden tender a orientarse en la dirección del flujo de llenado dentro de los moldajes (1).

El principal efecto de las fibras sobre el hormigón es el control de la fisuración, tanto en estado fresco como endurecido, que es donde el hormigón presenta una de sus mayores falencias, debido a su baja resistencia y capacidad de deformación en tracción. Las fibras funcionan como agarre entre el hormigón cuando comienza a fisurarse, trabajando en conjunto para evitar el aumento de las fisuras, incrementando así la ductilidad del compuesto (8). En estado endurecido el HRF puede seguir soportando cargas incluso después del agrietamiento de la matriz cementicia, lo que un hormigón convencional es incapaz de realizar.

En la Figura 2 se observa como un hormigón reforzado con fibras resiste mayores cargas de flexión, luego de la primera fisura, aumentando así notablemente su tenacidad (área bajo la curva carga-deformación), respecto a uno convencional que al agrietarse comienza a colapsar. Las fibras además pueden incrementar la capacidad resistente del compuesto frente a sollicitaciones de tracción.

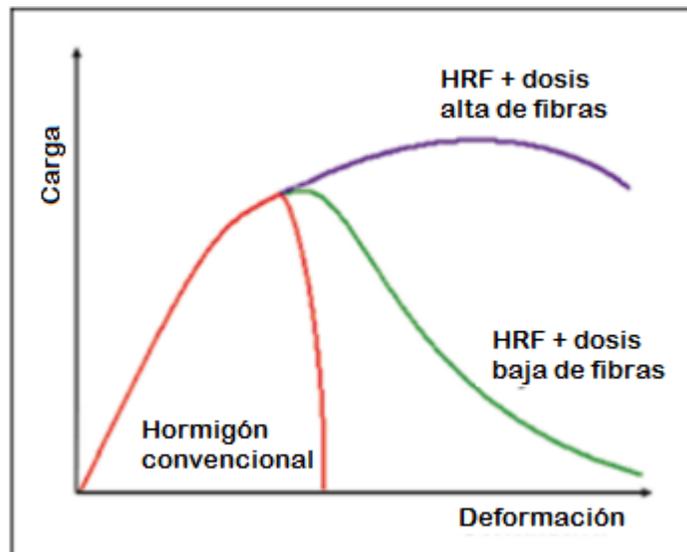


Figura 2. Curvas típicas Carga-Deformación en hormigón reforzado con fibras (3).

Dependiendo de la composición, tipo y contenido de fibras ( $C_f$ ), los HRFs presentan un comportamiento con:

- a) Reblandecimiento post-fisuración (softening)
- b) Endurecimiento post-fisuración (hardening)

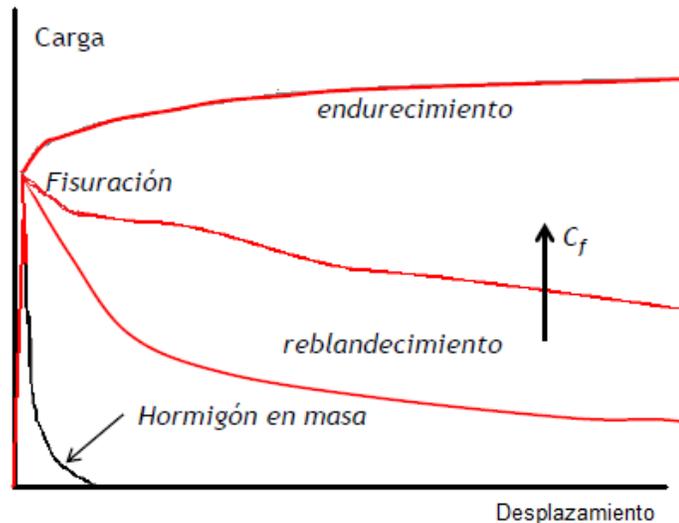


Figura 3. Curvas carga-desplazamiento para distintos comportamientos de HRF (26).

### 2.3. Influencia de las fibras sobre el HAC

Estudios anteriores sobre hormigones autocompactantes reforzados con fibras metálicas indican que las fibras influyen en la fluidez y la viscosidad. La fluidez del hormigón baja, mientras la viscosidad aumenta, esto debido a que las fibras aumentan la cohesión entre los elementos del compuesto (9).

Para mantener las características de autocompactabilidad en hormigones reforzados con fibras, las dosis de fibras y de aditivos deben ser estudiadas realizando ensayos en estado fresco a los hormigones de prueba hasta obtener valores adecuados correspondientes a los de un HAC.

Además, al confeccionar HRF se debe tener cuidado al incorporar las fibras, de forma que éstas no se aglomeren, y puedan provocar problemas en el hormigón.

## **2.4. Aplicaciones**

### **2.4.1. HAC**

En general el uso que tiene el hormigón autocompactante es en casos donde la colocación es compleja y/o donde existe la presencia de elementos con altas cuantías de armadura, que son los casos donde se dificulta la compactación del hormigón. También puede ser usado en casos donde se necesite reducir el ruido en el ambiente, ya que no es necesario el uso de vibradores. Algunos ejemplos de usos que se le da al HAC son en puentes (bloques de anclaje, pilas), tanques de almacenamiento de gas licuado, revestimiento de túneles (dovelas prefabricadas), columnas de edificios, fundaciones y en la industria de elementos prefabricados

### **2.4.2. HRF**

El uso de hormigones reforzados con fibras es variado, destacando su aplicación en hormigón proyectado, elementos prefabricados, protección contra el desprendimiento por fuego, hormigones masivos, como remplazo de malla secundaria en la construcción de túneles, losas (pisos industriales, caminos, aeropuertos, overlays, vías de tren) eliminando parcial o totalmente la armadura, reparaciones de estructuras en ambientes marinos y terrestres (puentes, túneles, edificios), estructura expuestas a impactos y explosiones, entre muchos otros (1).

## **2.5. Normativa y Ensayos**

Dadas las diferencias en las características del hormigón autocompactante y del hormigón reforzado con fibras respecto a los convencionales, se deben aplicar normativas distintas a las que usualmente son utilizadas para caracterizar los hormigones, de manera de estudiar correctamente este tipo de compuestos.

### 2.5.1. Ensayos en estado fresco

Las propiedades de los hormigones autocompactantes en estado fresco son medidas mediante una serie de ensayos que tratan de identificar la autocompactabilidad del hormigón, es decir sus principales propiedades, capacidad para llenar los espacios de los moldajes (capacidad de llenado) y pasar a través de obstáculos sin perder su homogeneidad ni crear obstrucciones (resistencia al bloqueo y a la segregación), además de la viscosidad.

Los principales ensayos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Principales ensayos para evaluar las propiedades en estado fresco de HAC (10).**

Característica	Método	Valor medido
Fluidez/capacidad de llenado	Flujo de escurrimiento	Extensión total
	Caja Kajima	Inspección visual de capacidad de llenado
Viscosidad/fluidez	T <sub>500</sub>	Tiempo de flujo
	Embudo V	Tiempo de flujo
	Embudo O	Tiempo de flujo
	Orimet	Tiempo de flujo
Resistencia al bloqueo o capacidad de paso	Caja L	Diferencia de altura
	Caja U	Diferencia de altura
	Anillo J	Altura, flujo total
	Ensayo de Traba Móvil (Caja Kajima)	Inspección visual de capacidad de relleno
Resistencia a la segregación	Penetración	Profundidad
	Embudo V a T <sub>5 min</sub>	Tiempo de flujo
	Ensayo de estabilidad GTM o de segregación en tamiz	Porcentaje de lechada
	Columna de asentamiento	Porcentaje de segregación

### 2.5.1.1. Ensayo de escurrimiento

Este ensayo es uno de los más utilizados debido a su sencillez y a que se utiliza el mismo cono que para el ensayo de asiento en cono de Abrams habitual. Con este método es posible evaluar la capacidad de relleno y la fluidez de la muestra. Se realiza de acuerdo a la norma europea EN 12350-8 (23).

Se utiliza el cono de Abrams y una placa cuadrada con una arista mínima de 900 mm y 2 mm de espesor, a la que se le marcan circunferencias de 200 mm y 500 mm de diámetro, centradas en su superficie. Además es necesario un cronómetro con precisión de segundos y una huincha de medir métrica.

El ensayo básicamente consiste en llenar el cono de Abrams de una sola vez, centrado en la circunferencia de 200 mm en la placa, sin aplicar algún método de compactación. Se nivela la superficie superior del hormigón y antes de que pasen 30 segundos se levanta el cono cuidadosa y continuamente (2 a 3 segundos), dejando que el hormigón se esparza en la placa. Primero se determina el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar el círculo marcado de 500 mm y luego el diámetro final que alcanza el círculo de hormigón extendido, midiendo el diámetro más largo, el perpendicular a éste y calculando la media. Se obtienen dos parámetros de este método, el valor  $T_{500}$ , que corresponde al tiempo que tarda la muestra en alcanzar el círculo marcado en la placa de 500 mm de diámetro y el diámetro final del hormigón extendido, en caso de que los dos diámetros medidos tengan una diferencia mayor a 5 cm, se debe repetir el ensayo.

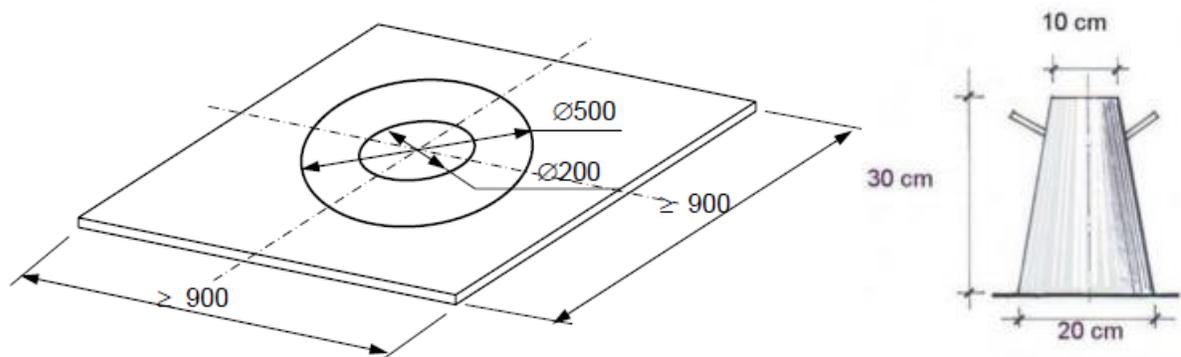


Figura 5. Esquema y dimensiones placa para ensayo de escurrimiento (10). Figura 4. Cono de Abrams (10).

### 2.5.1.2. Ensayo del embudo en V

Este ensayo se realiza mediante el aparato cuyas dimensiones y características se muestran en la Figura 6, aunque dependiendo de la norma utilizada pueden variar. Mediante este ensayo es posible evaluar la fluidez y la viscosidad del hormigón. A continuación se detallará el ensayo de acuerdo a la norma europea EN 12350-9 (23).

El ensayo consiste en lo siguiente: con el embudo en V limpio, se cierra la compuerta inferior, se llena con la muestra de hormigón de manera continua sin compactar, se nivela la parte superior y se coloca un contenedor bajo el embudo. Después de transcurridos  $(10 \pm 2)$  segundos se abre la compuerta inferior y se mide el tiempo desde la apertura de la compuerta hasta cuando es posible ver verticalmente a través del embudo hacia el contenedor debajo.

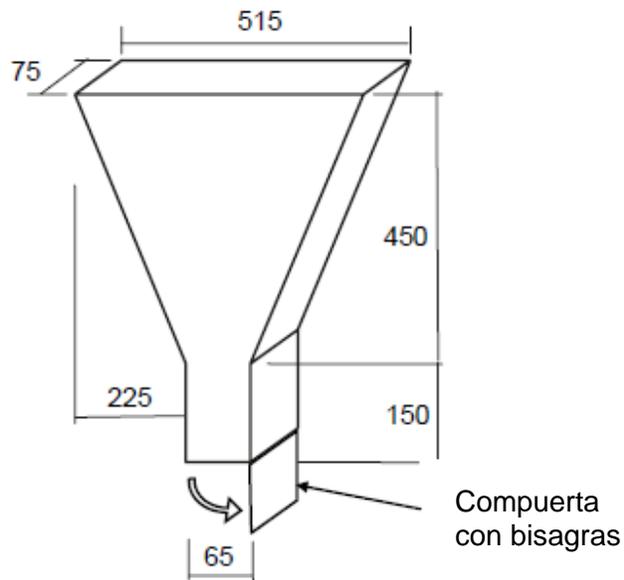


Figura 6. Esquema y dimensiones Embudo en V (10).

### 2.5.1.3. Ensayo de la caja L

El ensayo de la caja L es utilizado para evaluar la capacidad de paso o resistencia al bloqueo de hormigones autocompactables sin segregación. Se realiza de acuerdo a la norma europea EN 12350-10 (23).

La caja tiene forma de L, posee entre su sección vertical y horizontal una compuerta, además en la sección horizontal es posible instalar 2 o 3 barras después de la compuerta que simulan armaduras de refuerzo para hormigón, estas características y las dimensiones del aparato se muestran en la Figura 7.

Además del aparato se necesitan un contenedor de al menos 14 litros y una regla graduada entre (0 – 300) mm con intervalos de 1 mm.

El procedimiento comienza ubicando el aparato en una base nivelada horizontalmente y cerrando la compuerta. Posteriormente, se llena completamente la sección vertical de la caja de forma continua y se deja reposar durante  $(60 \pm 10)$  segundos. Se registra cualquier presencia de segregación y se levanta la compuerta dejando que la muestra fluya por la sección horizontal pasando a través de las barras. Luego de que el movimiento ha cesado, se mide la caída de altura del hormigón ( $\Delta H1$ ) en la sección vertical hacia el lado de la compuerta del aparato en 3 posiciones equiespaciadas a lo ancho. La profundidad media ( $H1$ ) es la diferencia entre la altura del aparato en la sección vertical y el promedio de las 3 medidas  $\Delta H1$ . El mismo procedimiento se utiliza para calcular la profundidad media al final de la sección horizontal de la caja ( $H2$ ), se obtiene de la diferencia entre la altura de la sección horizontal de la caja y el promedio de 3 medidas de  $\Delta H2$ . La capacidad de paso PA (*passing ability*<sup>1</sup>) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PA = \frac{H2}{H1}$$

---

<sup>1</sup> Passing ability en español significa capacidad de paso.

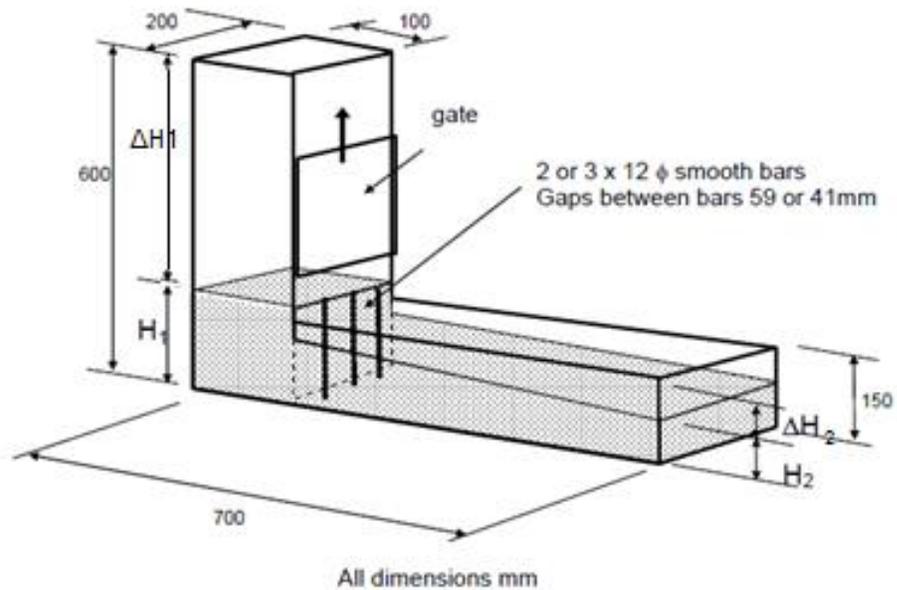


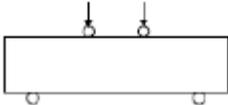
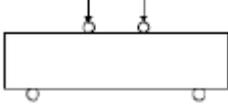
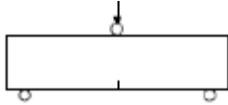
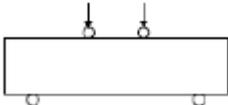
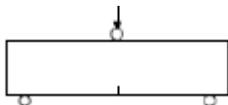
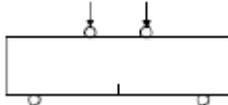
Figura 7. Dimensiones y características de la Caja L (10).

### 2.5.2. Ensayos en estado endurecido

La resistencia residual o post agrietamiento y la tenacidad son las principales características que distinguen al hormigón reforzado con fibras. Estas propiedades son medidas por medio de ensayos de flexión que se realizan a probetas prismáticas de hormigón. La carga que recibe la probeta es registrada y se utiliza el momento generado en el área central para calcular indirectamente el esfuerzo de tracción cuando la probeta comienza a fisurarse y su resistencia residual a determinados desplazamientos, cuando el hormigón ha dejado de actuar y las fibras resisten la carga.

Existen distintos estándares para este tipo de ensayos, destacando los europeos y americanos, que utilizan diferentes configuraciones al realizar los ensayos. Las normas de ensayo más utilizadas las mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2. Principales ensayos para evaluar la resistencia a flexión de HRF (11).**

Ensayo	Configuración	Dimensiones probeta (mm x mm x mm)	Parámetros para caracterizar HRF
ASTM C1399		100 x 100 x 350	- Resistencia residual media.
ASTM C1609		100 x 100 x 350 150 x 150 x 50 Variable	- Resistencia de primera fisura. - Resistencia residual - Tenacidad. - Resistencia equivalente.
EN14651		150 x 150 x 550-700	- Resistencia de primera fisura. - Resistencias residuales
JCI-SF4		100 x 100 x 350 ( $l_f \leq 40$ mm) 150 x 150 x 50 ( $l_f > 40$ mm)	- Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Tenacidad.
NBN B 15-238		150 x 150 x 600-750	- Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Tenacidad.
RILEM TC 162-TDF		125 x 75 x 550	- Resistencia de primera fisura. - Resistencias residuales. - Tenacidad.
UNI 11039-2		150 x 150 x 600	- Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Índices de ductilidad.

donde:

$l_f$  = largo de fibra [mm].

### 2.5.2.1. Ensayo de resistencia a flexotracción (resistencia residual)

Este método permite evaluar el desempeño a flexión de hormigones reforzados con fibras usando parámetros determinados a partir de la curva carga-deformación, obtenida de ensayar una viga con entalla<sup>2</sup> simplemente apoyada cargada el medio usando maquinaria especializada, conforme a la norma europea EN 14651 (24). Este ensayo se puede realizar de dos manera, la primera es midiendo la apertura de la fisura (CMOD, *crack mouth opening displacement*<sup>3</sup>) de la probeta ensayada o midiendo la flecha de esta, para efectos de este estudio se describe a continuación el ensayo midiendo la flecha de la probeta, ya que ese será la forma utilizada para ensayar los hormigones de prueba.

Para esto se confeccionan probetas prismáticas de 150x150x550-700 mm, con entalla, y se cargan al centro de la luz de 500 mm, como se puede apreciar en la Figura 8. La forma y tamaño de las probetas son adecuados para hormigones que contengan áridos de 32 mm de tamaño máximo y fibras de 60 mm de longitud máxima.

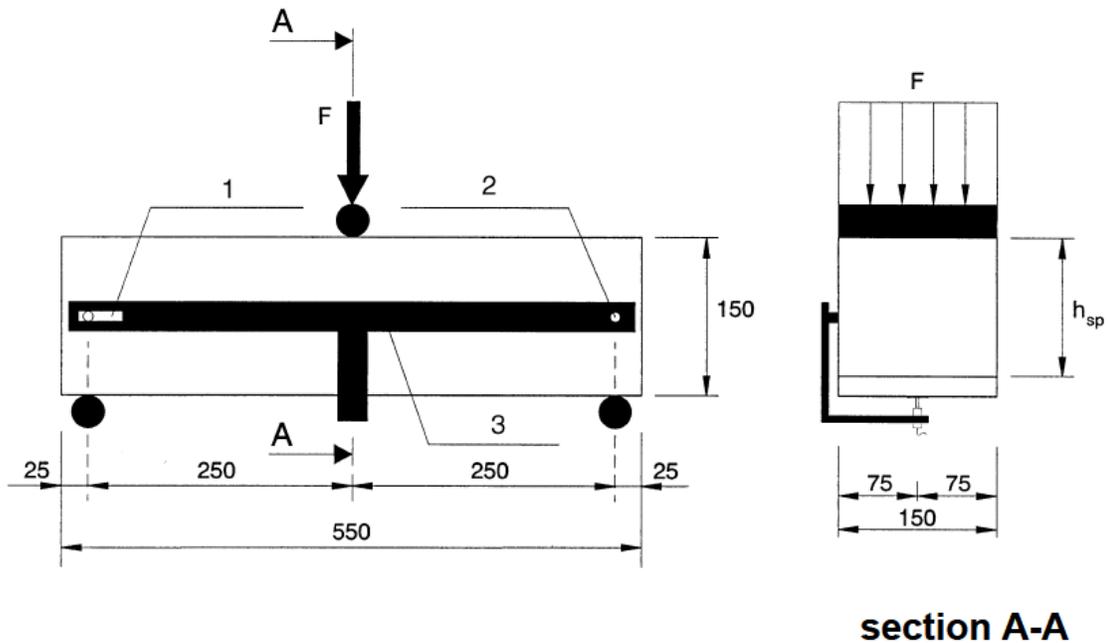


Figura 8. Configuración para ensayo EN 14651 (24).

<sup>2</sup> Corte realizado a la probeta de hormigón, con el objetivo de guiar su falla.

<sup>3</sup> Desplazamiento del borde de la fisura, medido mediante un transdutor instalado en la apertura de la fisura (24).

La entalla debe hacerse a lo ancho en la sección central de la luz perpendicular al eje longitudinal de la probeta, debe tener un espesor menor o igual a 5 mm y una altura desde el fondo de la entalla hasta la cara superior de ensayo de la probeta ( $h_{sp}$ ) de  $125 \pm 1$  mm, y manteniendo la cara de llenado de forma vertical.

Se deben tomar las medidas de ancho ( $b$ ) y de distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta ( $h_{sp}$ ) mediante un calibre. Y mediante una huincha se medirá la longitud media de la luz ( $l$ ).

Se instala un transductor de desplazamiento sobre un bastidor rígido, que se fija a la probeta, el transductor mide el desplazamiento en el centro de la entalla, ver Figura 8.

La prensa de ensayo funciona a una tasa de deformación constante de 0,08 mm/min hasta alcanzar una flecha de 0,13 mm, luego la tasa de deformación aumenta hasta 0,21 mm/min hasta el término del ensayo (3,44 mm de deformación).

El **límite de proporcionalidad (LOP)** es la tensión en el fondo de la entalla, a una deformación que asegura que la probeta no está agrietada, viene dado por la expresión:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2}$$

donde,

$f_{ct,L}^f$ , es el LOP, en newtons por milímetro cuadrado;

$F_L$ , es la carga correspondiente al LOP, en newtons;

$l$ , es la longitud de la luz, en milímetros;

$b$ , es el ancho de la probeta, en milímetros;

$h_{sp}$ , es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en milímetros.

$F_L$  será la carga máxima del diagrama carga/deformación hasta una flecha de 0,08 mm.

La **resistencia residual a la tracción por flexión**  $f_{R,j}$  es la tensión que se tiene en el fondo de la entalla a una cierta deformación, viene dada por la expresión:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

donde,

$f_{R,j}$ , es el LOP, en newtons por milímetro cuadrado;

$F_j$ , es la carga correspondiente al LOP, en newtons;

$l$ , es la longitud de la luz, en milímetros;

$b$ , es el ancho de la probeta, en milímetros;

$h_{sp}$ , es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en milímetros.

Las resistencias residuales más significativas que serán registradas se muestran la Tabla 3.

**Tabla 3. Resistencias a tracción por flexión a las deformaciones más significativas.**

Resistencia residual j	CMOD [mm]	Deformación [mm]
$f_{R,1}$	0,5	0,47
$f_{R,2}$	1,5	1,31
$f_{R,3}$	2,5	2,17
$f_{R,4}$	3,5	3,02

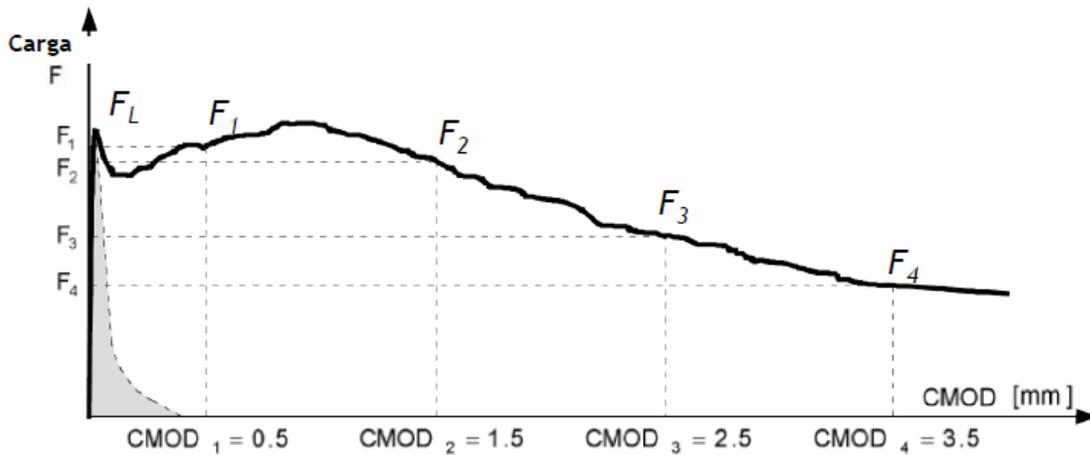


Figura 9. Curva carga-CMOD tipo del ensayo EN 14651.

### 2.5.2.2. Ensayo de compresión de probetas cúbicas

Esta norma establece el método para efectuar el ensayo a la rotura a compresión de probetas cúbicas confeccionadas de acuerdo a la norma chilena NCh 1037.Of 75 (20).

Se utiliza una prensa con la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de resultados, con una sensibilidad tal que la menor división de la escala de lectura sea inferior o igual al 1% de la carga máxima y la exactitud tendrá una tolerancia de  $\pm 1\%$  de la carga dentro del rango utilizable de la escala de lectura. Además se utiliza una regla graduada en mm con una longitud igual o superior a 400 mm y una balanza con una capacidad igual o superior a 25 kg. Y una precisión igual o superior al 0,1% de la pesada.

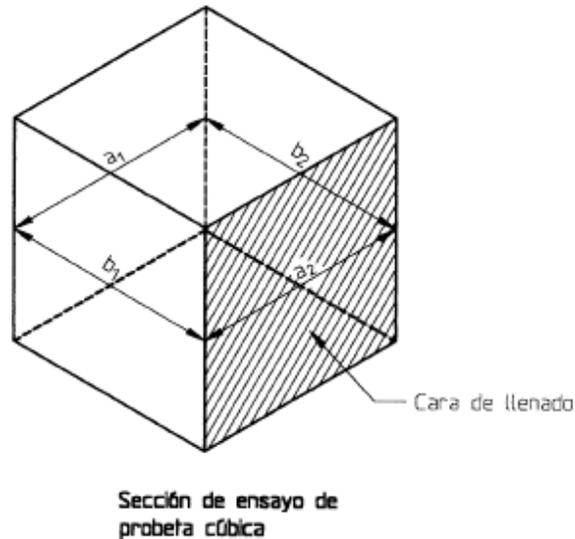
El procedimiento de ensayo sigue de la siguiente forma, se coloca la probeta con la cara de llenado verticalmente frente al operador, se miden los anchos y alturas de las cuatro caras laterales del cubo y se determina la masa de la probeta. Luego se limpia la superficie de las placas de la prensa y de las caras de ensayo de la probeta, se coloca la probeta en la placa inferior alineando su eje central con el centro de la placa, la cara de llenado debe estar perpendicular a las placas. Se asienta la placa superior sobre la probeta lo más uniforme posible y se carga en forma continua sin choques, a velocidad uniforme, de manera que la rotura se alcance en un tiempo igual o superior a los 100 segundos, para esto no se debe superar la velocidad de 0,35 N/m<sup>2</sup>/s.

Los resultados se calculan de la siguiente forma, primero se calcula la sección de ensayo mediante la expresión:

$$S = \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot \frac{b_1 + b_2}{2}$$

donde,

$a_1, a_2, b_1, b_2$ ; son los anchos de las caras laterales de la probeta determinados como se aprecia en la Figura 10.



**Figura 10. Esquema probeta cúbica para ensayo de resistencia a compresión.**

Luego se calcula la resistencia a compresión como la tensión de rotura según la siguiente expresión:

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

donde,

R = tensión de rotura,  $\frac{N}{mm^2}$  ;

P = carga máxima aplicada por la máquina de ensayo, N;

S = sección de ensayo,  $mm^2$  .

Y finalmente, se calcula la densidad de la probeta según la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\text{Peso}}{V} = \frac{\text{Peso}}{S \cdot h}$$

donde,

$\gamma$  = densidad de la probeta ensayada,

S = sección de ensayo,  $mm^2$  ;

h = altura promedio de la probeta, mm.

Peso = peso de la probeta antes del ensayo.

## Capítulo 3. Materiales

### 3.1. Cemento

El cemento utilizado para la fabricación de los hormigones para este estudio corresponde a un Cemento Melón Extra, cemento tipo Portland Puzolánico de grado Alta Resistencia, que cumple con la norma NCh 148. Of 68 (14).

De acuerdo a otras clasificaciones:

- Tipo IP (Cemento Portland Puzolánico) según norma ASTM C595 (21).
- Tipo HS (Alta resistencia a sulfatos) según norma ASTM C1157 (22).

**Tabla 4. Resultados de ensayos realizados a cemento Melón Extra.**

<b>Ensayos realizados</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra</b>	<b>Requisitos según NCh 148</b>
Peso específico	g/ml	2,96	No aplica
Superficie específica	cm <sup>2</sup> /g	5000	No aplica
Agua de consistencia normal	%	30,50	No aplica
Tiempo de fraguado – Inicial	H:min	1:40	≥ 0:45
Tiempo de fraguado – Final	H:min	2:30	≤ 10:00
Expansión en autoclave	%	-0,01	≤ 1
Resistencia mecánica - Flexión a 7 días	kgf/cm <sup>2</sup>	68	≥ 45
Resistencia mecánica - Flexión a 28 días	kgf/cm <sup>2</sup>	76	≥ 55

<b>Ensayos realizados</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra</b>	<b>Requisitos según NCh 148</b>
Resistencia mecánica – Compresión 7 días	kgf/cm <sup>2</sup>	476	≥ 250
Resistencia mecánica – Compresión 28 días	kgf/cm <sup>2</sup>	528	≥ 350
Pérdida por calcinación	%	1,9	≤ 4
Contenido de SO <sub>2</sub>	%	3,20	≤ 4
Residuo insoluble	%	9,5	≤30
Contenido MgO	%	-	No aplica
Contenido Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	No aplica

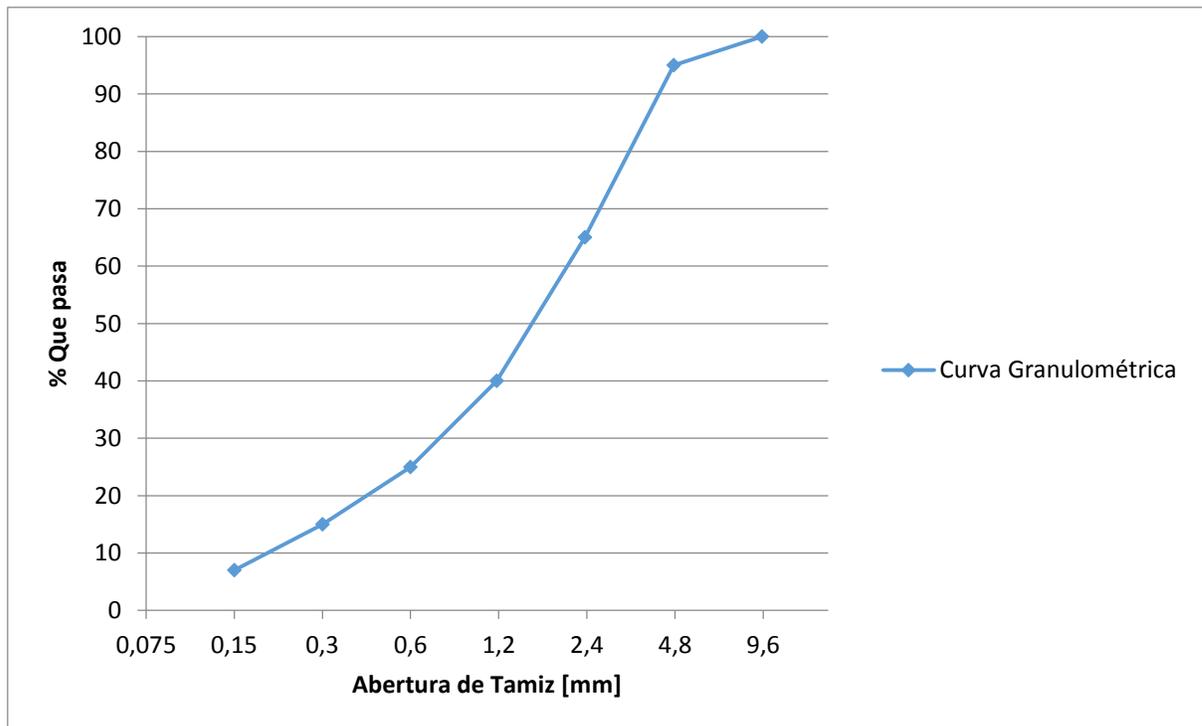
### 3.2. Áridos

Los agregados pétreos o áridos son los principales componentes del hormigón, representan la mayor parte del porcentaje en peso, e influyen en gran parte de las características mecánicas del material.

Los hormigones autocompactantes se caracterizan, en general, por la incorporación de arena fina en la mezcla para aumentar la cohesión del hormigón y evitar posibles segregaciones, pero para fines de este estudio solo se utilizará una arena gruesa, suponiendo el caso en que se disponga de una escasa variedad de áridos. Se deja propuesta la posibilidad de confeccionar este tipo de hormigones con arenas finas en estudios posteriores.

El árido utilizado para la confección de los hormigones en este trabajo corresponde a una arena gruesa natural proveniente del río Maipo, Región Metropolitana. Las características de la arena se obtuvieron mediante la realización de ensayos por parte del centro de investigación y desarrollo IDIEM, de acuerdo a las siguientes normas:

- Determinación de la granulometría, según NCh 165 Of. 77 (15).
- Determinación de las densidades aparentes, según NCh 1116 Of. 77 (16).
- Determinación de las densidades real y neta, y la absorción de agua, según NCh 1239 Of. 77 (17).
- Determinación del contenido de materiales finos menores a 0,08 [mm] según NCh 1223 Of. 77 (18).



**Figura 11. Curva Granulométrica áridos.**

**Tabla 5. Principales características de la arena.**

Característica	Resultado
Tamaño máx. nominal (mm)	4,75
Módulo de Finura	3,40
Finos bajo malla 0,080%	3,3
Densidad real seca [kg/m <sup>3</sup> ]	2648
Densidad real sss [kg/m <sup>3</sup> ]	2687
Densidad Neta [kg/m <sup>3</sup> ]	2755
Absorción[%]	1,47
Materia Orgánica	No presenta
Densidad aparente Suelta [kg/m <sup>3</sup> ]	1706
Densidad aparente. Compactada [kg/m <sup>3</sup> ]	1816

### **3.3. Fibras**

Las fibras utilizadas para el desarrollo de este trabajo son de dos tipos, ambas sintéticas con función estructural, elaboradas en base al mismo material, polímero de olefina, pero con distintas propiedades geométricas. La dosificación recomendada de cada fibra varía en un rango de entre 2 a 10 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.

Este tipo de fibras sintéticas trabajan por adherencia, es decir absorben energía al deslizar dentro de la matriz cementicia gracias al relieve que poseen y resisten carga debido a este mismo relieve.

Las características de cada fibra se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.- Principales características de las fibras.**

	Barchip 48	Barchip dúctil 57
<b>Finura [dtex]</b>	3500	3000
<b>Largo [mm]</b>	48	57
<b>Peso/fibra [gr]</b>	0,017	0,017
<b>Área [mm<sup>2</sup>]</b>	0,385	0,330
<b>Diámetro equivalente [mm]</b>	0,700	0,648
<b>Relación aspecto</b>	69	88
<b>Fibras por Kg.</b>	59.524	58.480
<b>Resistencia a tensión [MPa]</b>	640	680
<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	0,90 - 0,92	0,90 - 0,92
<b>Módulo de Young's [MPa]</b>	10	13
<b>Material base</b>	Olefina	Olefina
<b>Punto de fusión [°C]</b>	150 - 170	150 - 170
<b>Punto de ignición [ &gt;°C ]</b>	450	450
<b>Textura superficial</b>	Relieve continuo	Relieve continuo



**Figura 12. Vista de cerca de las fibras.**

Ambas fibras poseen una textura superficial continua, pero la fibra Barchip 48 tiene un relieve mayor que la Barchip Dúctil 57.

La fabricación de ambas fibras se hace de acuerdo a los estándares de la norma ISO 9001.

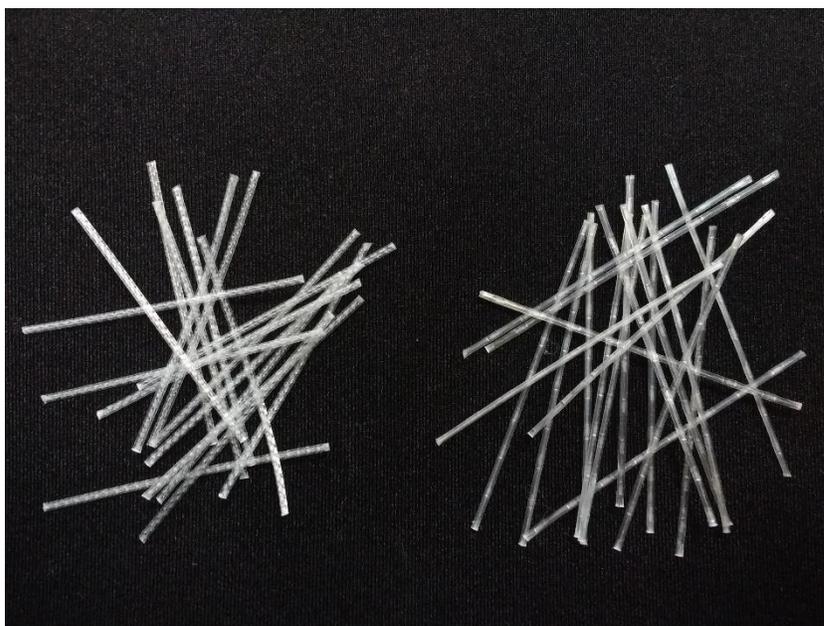


Figura 13. Imagen de las dos fibras utilizadas en este estudio Barchip 48 (izquierda) y Barchip Dúctil 57 (derecha).

### 3.4. Aditivos

Para la confección de hormigones se utilizaron tres tipos de aditivos, un plastificante retardante (Tipo D), un superplastificante (Tipo F) y un modulador de viscosidad, con el fin de obtener un hormigón fluido que cumpla con las principales características de un autocompactante, sin la necesidad de aumentar la relación agua/cemento, lo que puede perjudicar su desempeño en estado endurecido.

#### 3.4.1. Plastificante (Plastocrete 1390)

Los aditivos plastificantes reducen en baja medida la cantidad de agua necesaria para la fabricación de hormigones, aumentando la trabajabilidad de éstos sin la necesidad de aumentar significativamente la relación agua/cemento de ellos. Además, aumentan la resistencia a la compresión, entre otras propiedades que pueden ser mejoradas.

Plastocrete 1390 es un aditivo reductor de agua de bajo desempeño con efecto retardador en el hormigón y que aumenta sus resistencias mecánicas. Es utilizado en dosis de entre 0,4% a 0,7% respecto al peso del cemento utilizado para la confección de hormigones. Aditivo tipo D acorde a la norma chilena NCh 2182 Of.95 (19).

### **3.4.2. Superplastificantes**

Los superplastificantes son aditivos que reducen en gran cantidad el agua de amasado necesaria, sin producir segregación ni otros efectos negativos, además de reducir el contenido de aire dentro del hormigón. Son esenciales en la producción de hormigones autocompactantes, debido a que entregan una gran fluidez, manteniendo la consistencia y relación agua/cemento deseada.

#### **3.4.2.1. Viscocrete 5100**

Viscocrete 5100 es un aditivo de alta capacidad de reducción de agua, basado en polímeros sintéticos que permite una máxima fluidez, alta cohesión y que mantiene la trabajabilidad deseada de forma prolongada. Ideal para uso en hormigones autocompactantes, con una reducción alta de agua (30%), además incrementa el desarrollo de alta resistencia inicial y mejora el comportamiento en fluencia y retracción. Se usa en dosis de 0,3% a 1,5% respecto al peso del cemento. Es un aditivo tipo F de acuerdo a la norma chilena NCh 2182 Of.95 (19).

#### **3.4.2.2. Masterglenium 1305**

Masterglenium 1305 es un aditivo tipo F de acuerdo a la norma chilena NCh 2182 Of.95 (19), en base a éter policarboxilato. Reduce la cantidad de agua necesaria de entre 15% a 35%. Recomendado para hormigones con baja relación agua/cemento, hormigones con alta resistencia temprana y final, hormigones de alta fluidez y durabilidad, hormigón autocompactante, entre otros. La dosis recomendada es de 0,3% a 1,6% respecto al peso del cemento.

### **3.4.3. Modulador de viscosidad (Walocel)**

Los moduladores de viscosidad o modificadores reológicos son aditivos que aumentan la cohesión interna del hormigón con mínimas pérdidas en su fluidez. Son usados en casos de falta de finos en la mezcla, donde la cohesión interna no es lo suficiente y el hormigón tiende a segregarse. El empleo de este tipo de aditivos además de aumentar la cohesión y disminuir la segregación, hace al hormigón más tolerante a variaciones en las dosis de agua y en casos de áridos con granulometrías discontinuas o con falta de finos. Este aditivo se consideró ante la eventualidad de no lograr las características de un hormigón autocompactante deseadas con los áridos disponibles.

## Capítulo 4. Programa Experimental y Resultados

### 4.1. Estudio de dosificación

Para obtener la dosis utilizada para la confección de los hormigones de prueba, primero se hicieron mezclas para definir las dosis de aditivos con el fin de evaluar la compatibilidad entre los materiales disponibles y obtener hormigones con características autocompactantes.

La dosis base usada de cemento, áridos y agua para el estudio de dosificaciones fue de 500 kg/m<sup>3</sup> cemento, 1501 kg/m<sup>3</sup> de arena seca y una relación agua/cemento de 0,45, correspondiente a una dosis típica para hormigones autocompactantes. Esta dosis se mantuvo tanto para el estudio de dosificaciones como para la confección de los hormigones definitivos, variando solo la dosis de aditivos y fibra.

Luego se hicieron una serie de hormigones iterando la dosis de aditivos para llegar a un hormigón como el descrito anteriormente. En los primeros hormigones confeccionados se notó una excesiva exudación y segregación de los componentes, lo que pudo haberse debido a la falta de finos del árido usado, por esto se tomó la decisión de utilizar un modulador de viscosidad para aumentar la cohesión de la mezcla, sin desmedro de la fluidez. De lo anterior se obtuvo la dosis que se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7. Primera dosificación.**

<b>Cemento [kg]</b>	500
<b>Arena seca [kg]</b>	1501
<b>Agua [kg]</b>	225
<b>Plastocrete MX1390 [gr]</b>	2250 (0,45%*)
<b>Viscocrete 5100[gr]</b>	2850 (0,57%*)
<b>Walocel [gr]</b>	20 (0,004%*)

(\*) El porcentaje de dosis de aditivo es respecto al peso del cemento, es decir:  
Dosis de aditivo [%] = (peso aditivo/ peso cemento)\*100

La capacidad de relleno se logró mediante el uso del superplastificante anteriormente mencionado sin mayor problema, obteniendo una fluidez adecuada. Para la resistencia a la segregación, como fue mencionado antes, fue necesaria la incorporación de un modulador de viscosidad. La capacidad de paso a través de armaduras se verá en punto 4.2.

## 4.2. Límite máximo de contenido de fibra

Con la dosis mostrada en la Tabla 7 se hizo una serie de ensayos con el fin de obtener la dosis máxima de cada fibra que permita obtener una capacidad de paso aceptable para un hormigón autocompactante. Esta propiedad se midió mediante el Ensayo de Caja L, acorde a la norma europea EN 12350-10 (23), con dos barras en vez de tres, para así flexibilizar la dosis de fibra y ya que una característica de las fibras estructurales es la de reemplazar parcial o totalmente la cantidad de armaduras de acero del hormigón armado. El valor en el ensayo de Caja L aceptable para hormigones autocompactantes es de 0,8 o superior (10). La dosis de fibra es el principal factor que influye en esta propiedad, debido a que las fibras quedan atrapadas entre las barras y forman un bloqueo, que impide que el compuesto fluya a través de ellas.

La máxima cantidad de cada fibra en las que se obtuvo valores aceptables en el ensayo de Caja L se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8. Resultados ensayo Caja L primera dosificación.**

	<b>Cantidad de fibras [kg/m<sup>3</sup>]*</b>	<b>Caja L</b>
<b>Hormigón con fibra Barchip 48</b>	4,5	0,85
<b>Hormigón con fibra Barchip Dúctil 57</b>	4	0,82

(\*) La dosis de fibra se mide en kilogramos por metro cúbico de hormigón.

La máxima dosis de fibra, determinada a través del ensayo de Caja L, establecerá el límite de fibras que se pueden incorporar en el hormigón sin perder las características típicas de un hormigón autocompactante, en este caso su capacidad de paso a través de las armaduras.

### 4.3. Hormigones de prueba

Antes de comenzar a confeccionar los hormigones de prueba se realizó un ensayo para medir la cantidad de aire incorporado dentro del hormigón y se obtuvo 9% de aire, lo que corresponde a un valor elevado para un hormigón de estas características, pudiendo esto disminuir su desempeño en estado endurecido. Por esto, se decidió probar otro aditivo superplastificante, Masterglennium 1305. Se realizó nuevamente un estudio de dosificaciones, que en este caso se hizo con fibras usando una dosis intermedia de estas ( $6\text{kg/m}^3$ ), luego de varias iteraciones se llegó a una dosis base de aditivos en la que se obtuvo un porcentaje de aire incorporado aceptable (6,2 %).

**Tabla 9. Dosificación base.**

<b>Cemento [kg]</b>	500
<b>Arena seca [kg]</b>	1501
<b>Agua [kg]</b>	225
<b>Plastocrete MX1390 [gr]</b>	2250 (0,45%*)
<b>Masterglennium [gr]</b>	3100 (0,62%*)
<b>Walocel [gr]</b>	12 (0,0024%*)

(\*) El porcentaje de dosis de aditivo es respecto al peso del cemento, es decir:  
 $\text{Dosis de aditivo [\%]} = (\text{peso aditivo} / \text{peso cemento}) * 100$

Las dosis de fibras a estudiar fueron de  $4\text{ kg/m}^3$ , considerada como la dosis máxima para obtener valores aceptables de Caja L, como se vio en el punto 4.2, además  $6$  y  $8\text{ kg/m}^3$  de fibra, en la que se deberán tener consideraciones especiales en caso de diseñar elementos estructurales debido a que no se tendrán valores de Caja L correspondientes a las de un autocompactante (disminuir cuantía de armadura o aumentar espaciamiento entre éstas), pero para fines de este estudio se tomó la decisión de usar esta cantidad de fibras para analizar las propiedades mecánicas al aumentarla.

Ya con la dosis de aditivo base y las distintas dosificaciones de fibras se confeccionaron los hormigones de prueba, para los que se utilizaron los materiales descritos anteriormente, cemento “Melón Extra” de clasificación IP de acuerdo a la norma ASTM C595 (21), en cumplimiento con la norma NCh 148 (14). El agregado pétreo utilizado corresponde a una arena con un tamaño máximo nominal de 5 mm. La relación agua/cemento utilizada fue de 0,45. Los aditivos usados fueron Plastocrete MX 1390, correspondiente a un plastificante retardador, Masterglennium 1305, aditivo

superplastificante; y Walocel, un modulador de viscosidad para evitar una posible segregación del hormigón. Los detalles de las dosificaciones de cada hormigón se muestran en la Tabla 10.

La nomenclatura de los hormigones son del tipo H-BXX-Y, donde H corresponde a hormigón, B corresponde a que es fibra Barchip, XX es el largo de la fibra en mm e Y es la dosis de fibra en kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 10. Dosificaciones para la confección de los hormigones definitivos.**

	H-Control	H-B48-4	H-B48-6	H-B48-8	H-B57-4	H-B57-6	H-B57-8
<b>Cemento [kg]</b>	500						
<b>Arena seca [kg]</b>	1501						
<b>Agua [kg]</b>	225						
<b>Plastocrete [gr]</b>	2250						
<b>Masterglenium [gr]</b>	3100						
<b>Walocel [gr]</b>	12	11	13,5	12			
<b>Tipo de fibra</b>	-	Barchip 48			Barchip Dúctil 57		
<b>Cantidad de fibra [kg]</b>	-	4	6	8	4	6	8

Cada hormigón fue confeccionado en una betonera tradicional de 120 lts de capacidad, que luego fue vertido en moldes prismáticos de 150x150x530 mm permitiendo el ensayo a flexión con una luz de 500 mm descrito en la norma europea EN 14651 (24), y en moldes cúbicos de 150x150x150 mm que permiten la realización de ensayos a compresión de acuerdo a la norma chilena NCh 1037.Of 77 (20). La fabricación y el curado de las probetas se hicieron conforme a las normas europeas EN 12390-2 (25) y EN 14651 (24).

#### **4.4. Resultados de ensayos en estado fresco**

A cada hormigón se le hizo una serie de ensayos en estado fresco para medir sus propiedades reológicas y de autocompactabilidad. Los ensayos realizados fueron el de flujo de asentamiento con cono de Abrams, donde se obtuvo el diámetro de escurrimiento y el T500, para medir la capacidad de relleno y la trabajabilidad; ensayo de Caja L, para medir la capacidad de paso del hormigón; ensayo de Embudo en V, para medir la fluidez y viscosidad. Además, se hicieron ensayos para obtener la

densidad, el porcentaje de aire incorporado y la temperatura de los hormigones. Los ensayos mencionados anteriormente se hicieron de acuerdo a la norma europea EN 12350 (23). Los resultados de esos ensayos se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11. Resultados de ensayos en estado fresco.**

	Diámetro de escurrimiento [mm]	T500 [s]	Caja L	Bloqueo caja L	Embudo V [s]	Densidad [ton/m <sup>3</sup> ]	Aire incorporado	T° [°C]
<b>H-Control</b>	750	1,00	0,90	No	3,30	2,26	4,5%	19,4
<b>H-B48-4</b>	750	1,20	0,78	Bajo	3,43	2,24	4,2%	19,2
<b>H-B48-6</b>	690	2,48	0,64	Moderado	3,36	2,19	7,0%	18,9
<b>H-B48-8</b>	665	3,34	0,56	Alto	4,21	2,20	6,0%	18,7
<b>H-B57-4</b>	730	2,04	0,76	Moderado	3,73	2,23	3,9%	18,6
<b>H-B57-6</b>	670	2,63	0,53	Alto	4,86	2,23	5,8%	20,4
<b>H-B57-8</b>	653	1,90	0,43	Muy Alto	5,60	2,20	6,6%	19,1

Se observó que al aumentar la cantidad de fibras la docilidad del hormigón disminuye, como se aprecia en los resultados de diámetro de flujo de asentamiento y en el T500 y también reduce la capacidad de paso, como se aprecia en los resultados de Caja L, esto se debe a que las fibras aumentan la cohesión del compuesto. El ensayo de embudo en V muestra que un aumento en la dosis de fibra aumenta la viscosidad del hormigón, pero manteniendo una viscosidad adecuada a la de un hormigón autocompactante (10).

En el ensayo de Caja L para los hormigones con fibra no se logró obtener el valor mínimo recomendado de capacidad de paso característico de un hormigón autocompactante, esto se debe a que la distancia de separación entre las barras de este ensayo respecto al largo de fibra es baja y las fibras forman un bloqueo que impide el paso del hormigón. Es posible que este ensayo no sea el más adecuado para estudiar la capacidad de paso de hormigones autocompactantes reforzados con fibras, para un mejor análisis hace falta un estudio más preciso con ensayos más adecuados para evaluar esta propiedad.

Respecto al porcentaje de aire incorporado, en el que se tuvieron problemas en el estudio de dosificaciones, es posible decir que las fibras no influyen en esta propiedad y que el alto porcentaje se puede deber al tipo de árido y a los aditivos

utilizados, más en concreto a la falta de finos en la arena y al uso del modulador de viscosidad que retiene el aire en la mezcla.



Figura 14. Ensayo de escurrimiento.



Figura 15. Ensayo de Caja L.

#### 4.5. Resultados de ensayos en estado endurecido

##### 4.5.1. Ensayos de resistencia a compresión

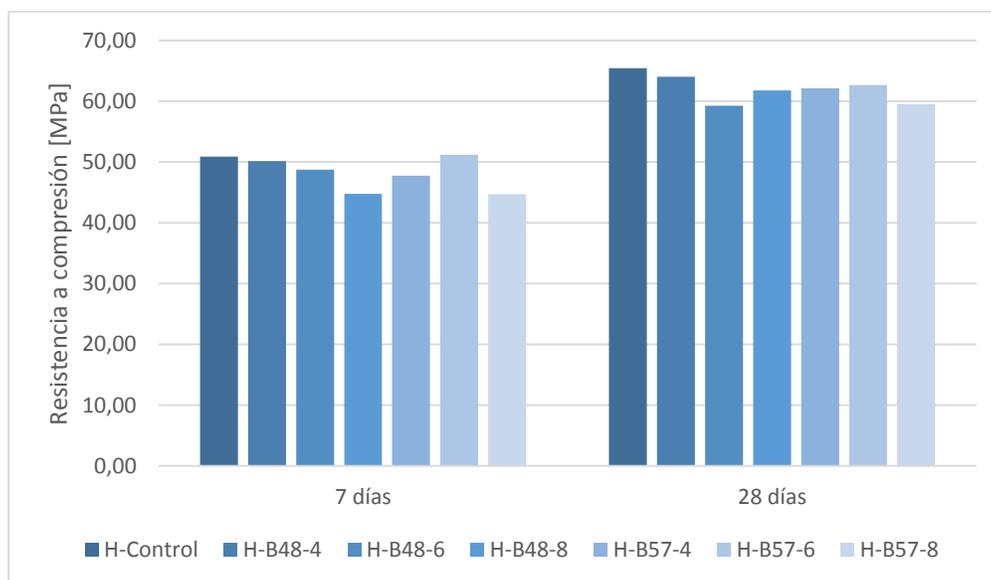
Los ensayos de compresión se hicieron a probetas cúbicas de 150x150x150 mm mediante una prensa hidráulica de acuerdo a la norma NCh 1037 Of.77 (20). Para cada hormigón se ensayaron 4 probetas, 2 a 7 días y 2 a 28 días. Los resultados de resistencia a compresión se muestran en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Resultados de resistencia a compresión a 7 días.

	Resistencia a compresión [MPa]		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
<b>H-Control</b>	50,7	51,1	50,9
<b>H-B48-4</b>	50,9	49,4	50,2
<b>H-B48-6</b>	48,9	48,7	48,8
<b>H-B48-8</b>	48,1	41,5	44,8
<b>H-B57-4</b>	47,0	48,5	47,8
<b>H-B57-6</b>	50,4	52,1	51,2
<b>H-B57-8</b>	45,2	44,3	44,7

**Tabla 13. Resultados de resistencia a compresión a 28 días.**

	Resistencia a compresión [MPa]		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
<b>H-Control</b>	68,4	62,6	65,5
<b>H-B48-4</b>	62,6	65,5	64,0
<b>H-B48-6</b>	59,7	58,8	59,3
<b>H-B48-8</b>	61,4	62,2	61,8
<b>H-B57-4</b>	61,9	62,4	62,1
<b>H-B57-6</b>	62,5	63,0	62,7
<b>H-57-8</b>	59,3	59,8	59,6



**Figura 16. Gráfico con promedios de resistencia a compresión a 7 y 28 días.**

Se puede apreciar que el hormigón de control tiene la mayor resistencia a compresión a los 28 días y el hormigón HB57-6 la mayor a los 7 días, pero aunque hay una diferencia de resistencia entre los distintos hormigones, no es significativa para poder concluir que las fibras influyen en la resistencia a compresión, y además no hay una tendencia clara en la variación de esta resistencia y la dosis de fibra. El coeficiente de variación que se tuvo para los hormigones ensayados a 7 días fue de 5% y de 3% para los ensayados a 28 días, valores bajos que indican que se tuvo poca diferencia de resistencia a compresión entre los 7 distintos hormigones y por lo tanto no se puede concluir sobre la influencia de las fibras en este ámbito.

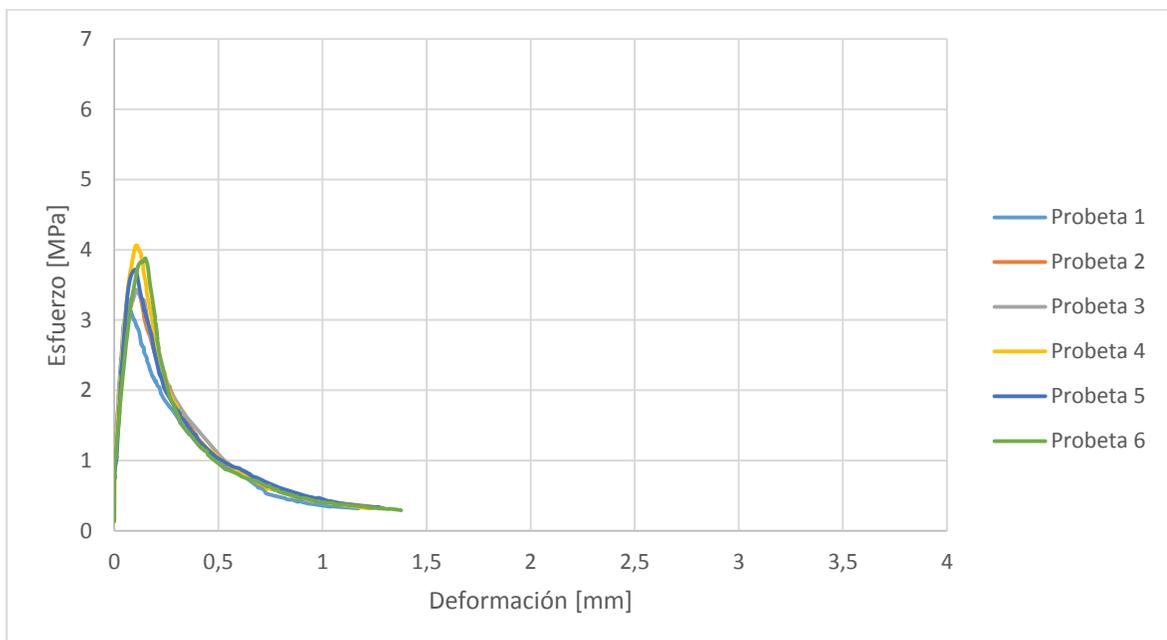
A los 7 días los hormigones lograron al menos 75% de la resistencia que a los 28 días.

#### 4.5.2. Resultados de ensayos de resistencia a flexotracción (resistencia residual).

Los ensayos de resistencia a flexión se hicieron a probetas prismáticas de 150x150x530 mm mediante una prensa que asegura una velocidad de deformación controlada de acuerdo al procedimiento descrito en la norma europea EN 14651 (24). Se ensayaron 6 probetas por cada tipo de hormigón. Los resultados de cada probeta se muestran en las Tablas 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20 y las curvas de cada una se pueden ver en las Figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23. En las tablas de todos los hormigones ensayados se muestran el coeficiente de variación (C.V.) para los esfuerzos a las distintas deformaciones estudiados.

**Tabla 14. Resultados de resistencia a flexión hormigón H-Control (s/fibras).**

H-Control	Deformación primer peak [mm]	Esfuerzo flexión [MPa]			
		LOP	Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$
1	0,102	3,18	3,24	1,49	0,26
2	0,135	2,73	3,43	1,52	0,30
3	0,141	3,04	3,41	1,48	0,25
4	0,134	3,31	4,06	1,32	0,23
5	0,134	3,32	3,71	1,32	0,27
6	0,175	2,90	3,88	1,14	0,24
<b>C.V.</b>	16%	7%	8%	10%	9%



**Figura 17. Curvas esfuerzo-deformación H-Control (sin fibras).**

Tabla 15. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB48-4.

H-B48-4	Deformación primer peak [mm]	Esfuerzo flexión [MPa]					
		LOP	Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,094	4,64	4,94	1,82	1,85	-	-
2	0,132	5,83	4,48	2,74	3,05	3,38	3,78
3	0,077	4,70	4,70	1,71	1,51	1,68	1,84
4	0,137	3,90	4,89	2,48	2,61	2,97	3,25
5	0,108	3,96	4,47	2,35	2,54	2,85	3,09
6	0,137	3,86	4,40	2,01	1,88	2,11	2,29
C.V.	20%	15%	5%	17%	24%	24%	24%

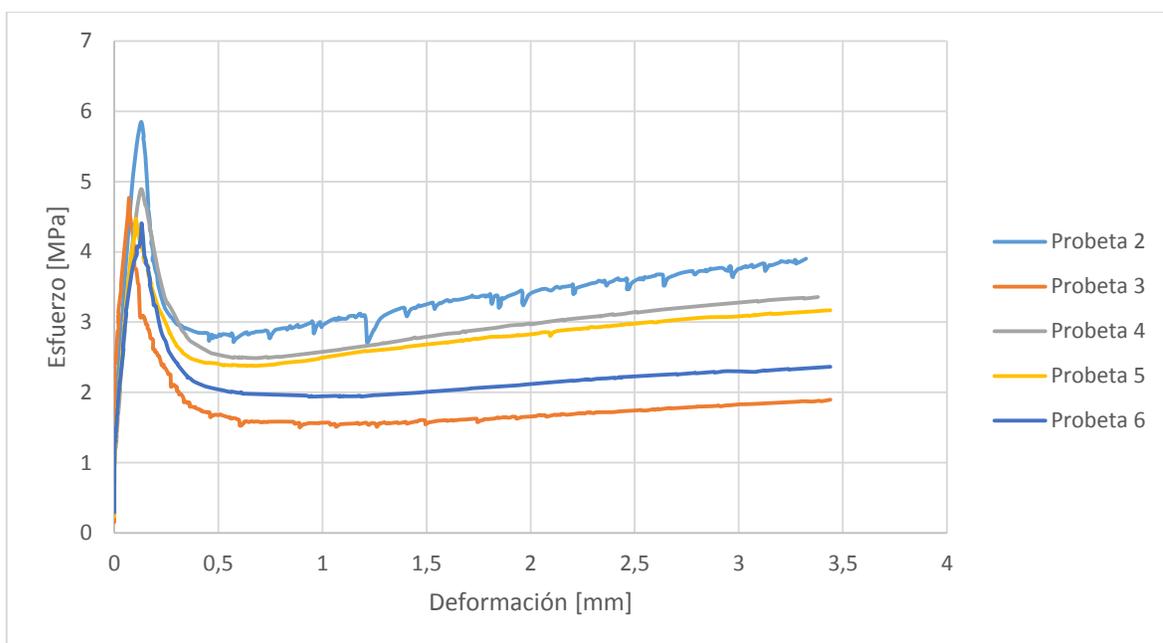


Figura 18. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B48-4.

La probeta 1 del hormigón H-B48-4 carece de datos en las últimas dos deformaciones debido a que el transductor no se instaló correctamente.

Tabla 16. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB48-6.

H-B48-6	Deformación primer peak [mm]	Esfuerzo flexión [MPa]					
		LOP	Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,156	3,28	4,65	2,44	2,43	2,76	3,03
2	0,093	5,28	5,36	3,86	4,61	5,29	5,41
3	0,163	3,50	5,06	3,09	3,31	3,74	4,00
4	0,159	3,57	4,83	2,89	3,01	3,44	3,79
5	0,142	3,52	4,85	2,77	2,81	3,23	3,28
6	0,121	3,99	4,67	2,74	3,03	3,45	3,81
<b>C.V.</b>	18%	17%	5%	15%	21%	22%	20%

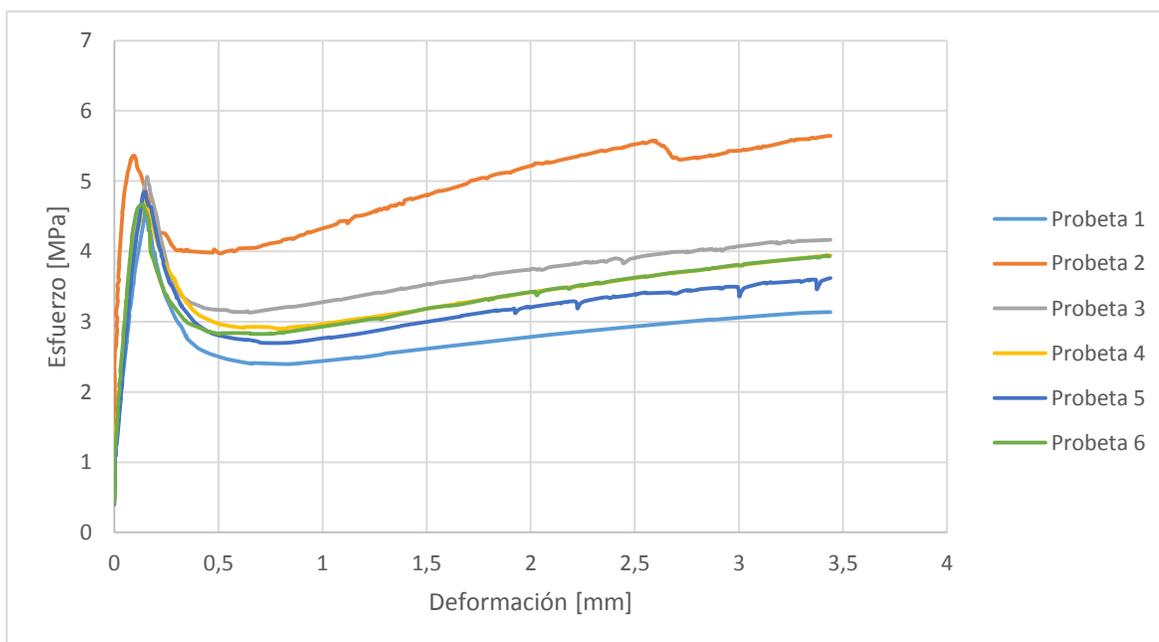


Figura 19. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B48-6.

La probeta n° 2 tuvo una resistencia significativamente mayor que las demás para todas las deformaciones estudiadas, lo que puede deberse a una mayor cantidad real de fibras.

Tabla 17. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB48-8.

H-B48-8	Deformación primer peak [mm]	Esfuerzo flexión [MPa]					
		LOP	Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,149	3,54	5,21	3,50	4,18	4,92	4,47
2	0,137	4,51	5,31	3,14	3,63	4,18	4,54
3	0,151	3,75	4,68	3,22	3,81	4,35	4,79
4	0,147	3,96	5,35	3,51	3,88	4,54	5,06
5	0,152	3,56	4,72	3,28	3,70	4,25	4,65
6	0,092	4,71	4,74	2,95	3,67	4,23	4,61
<b>C.V.</b>	15%	11%	6%	6%	5%	6%	4%

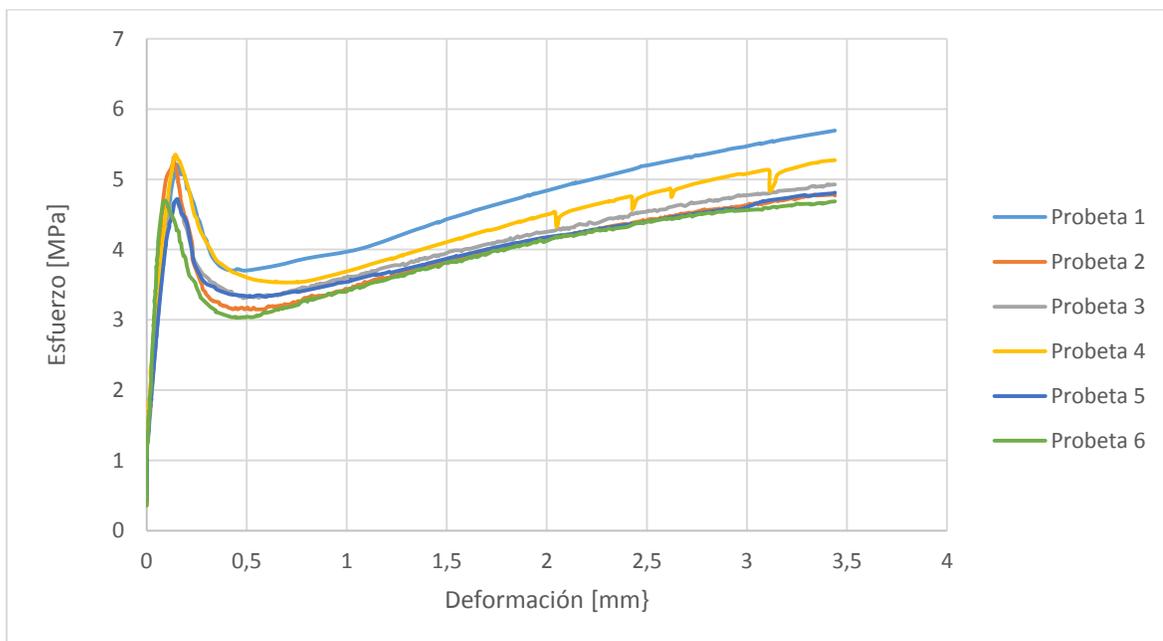


Figura 20. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B48-8.

Tabla 18. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB57-4.

H-B57-4	Deformación primer peak [mm]	Esfuerzo flexión [MPa]					
		LOP	Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,084	5,91	5,97	1,73	1,60	1,72	1,75
2	0,151	3,79	5,97	2,38	2,23	2,30	2,39
3	0,163	3,78	6,00	1,90	1,55	1,60	1,67
4	0,140	4,83	6,01	2,64	2,64	2,81	2,94
5	0,152	4,12	5,90	2,31	1,95	2,04	2,17
6	0,141	4,75	6,02	2,29	2,11	2,24	2,31
C.V.	15%	16%	1%	14%	19%	19%	19%

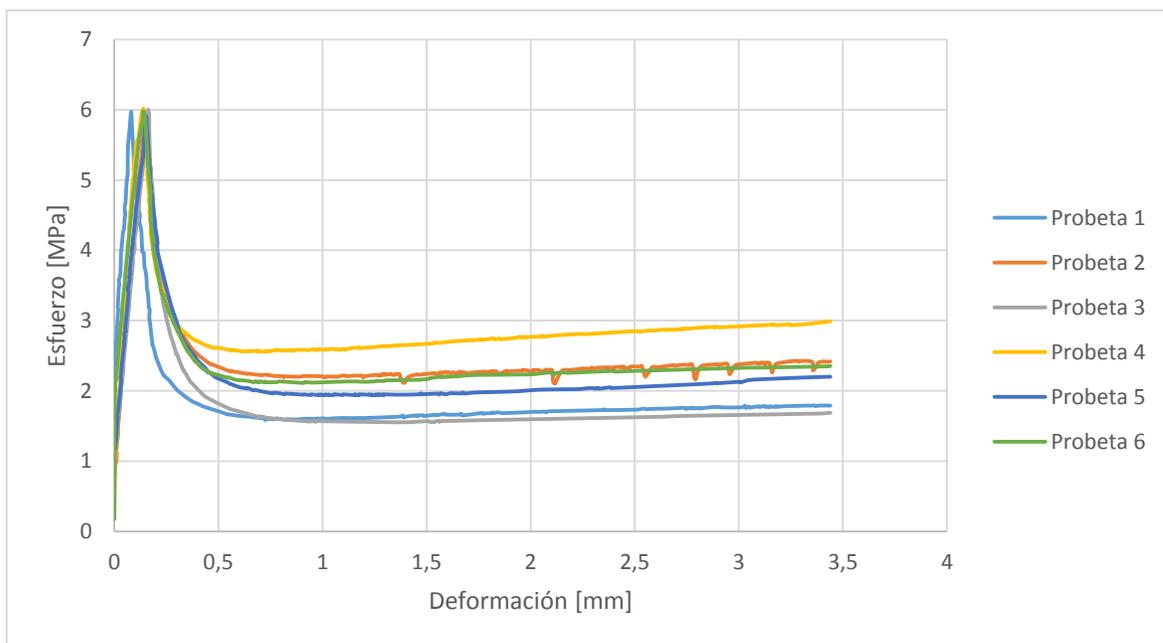


Figura 21. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B-57-4.

Tabla 19. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB57-6.

H-B57-6	Deformación primer peak [mm]	Esfuerzo flexión [MPa]					
		LOP	Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,114	4,57	5,38	3,29	3,29	3,51	3,64
2	0,161	3,68	5,71	3,18	3,01	3,25	3,40
3	0,106	5,13	5,87	2,65	2,55	2,78	2,92
4	0,118	5,24	5,70	3,71	3,70	4,03	4,21
5	0,126	4,41	5,48	2,94	2,86	3,00	3,16
6	0,146	4,79	5,01	3,71	3,97	4,22	4,35
C.V.	15%	11%	5%	12%	15%	15%	14%

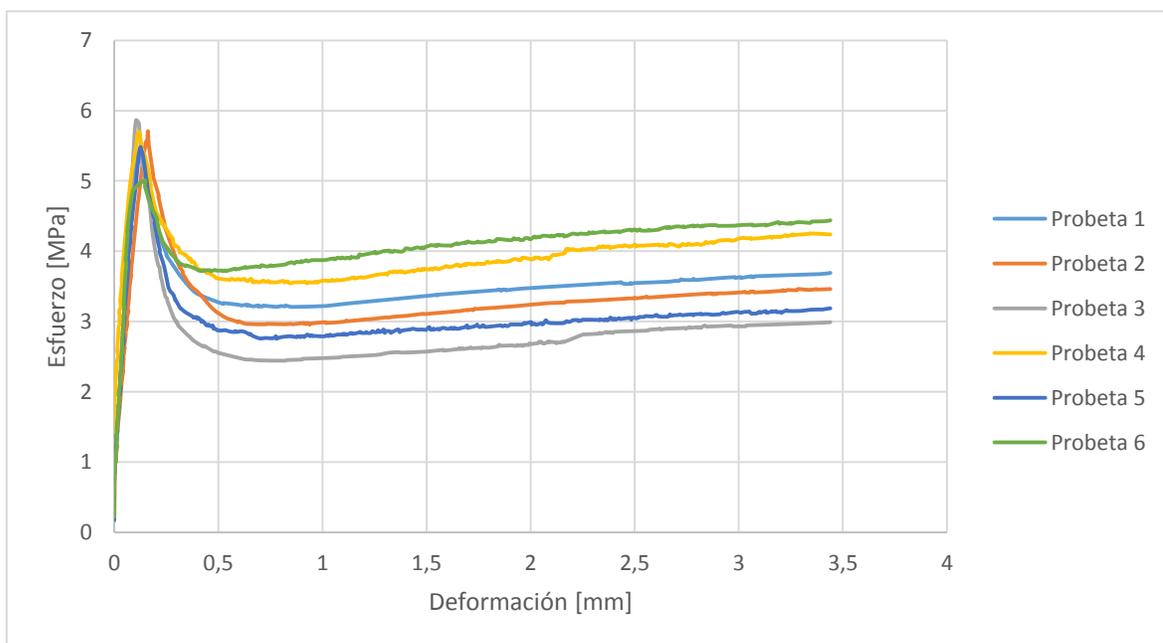


Figura 22. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B57-6.

Tabla 20. Resultados de resistencia a flexión hormigón HB57-8.

H-B57-8	Deformación primer peak [mm]	LOP	Esfuerzo flexión [MPa]				
			Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,14	4,56	3,66	3,84	4,14	4,37	3,66
2	0,15	4,28	3,40	3,37	3,53	3,68	3,05
3	0,14	4,72	4,25	4,44	4,72	4,93	3,66
4	0,09	4,66	3,95	4,06	4,31	4,50	4,52
5	0,17	4,31	2,78	2,67	2,78	2,90	3,07
6	0,23	4,81	4,40	4,65	4,96	5,04	3,71
C.V.	29%	14%	4%	15%	17%	18%	18%

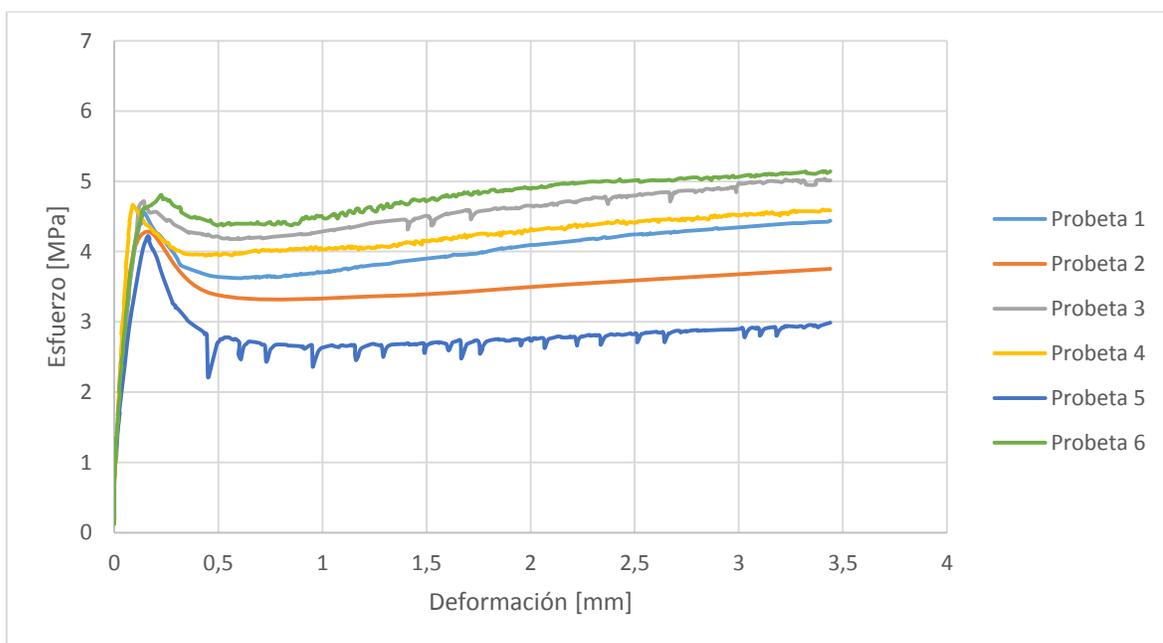


Figura 23. Curvas esfuerzo-deformación hormigón H-B57-8.



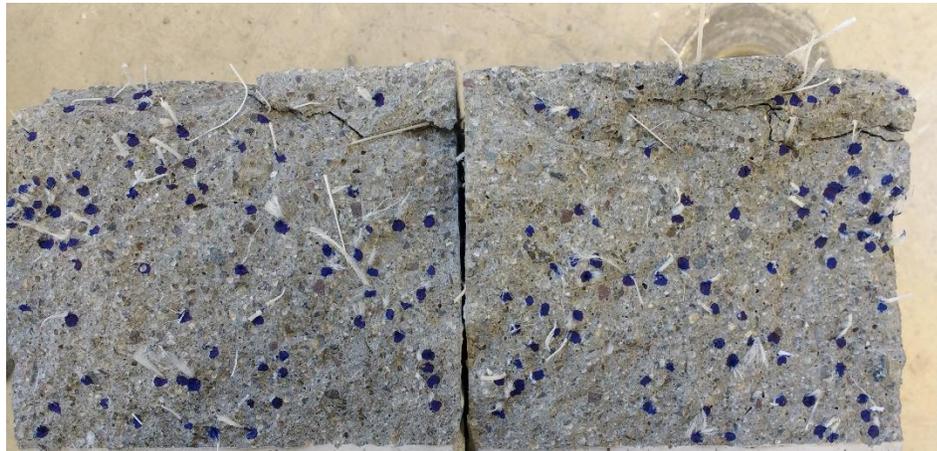
**Figura 24. Configuración ensayo de resistencia a flexión EN 14651 (24) y prensa utilizada para realizar los ensayos de resistencia a flexotracción y resistencia residual.**

#### 4.6. Distribución de fibras

Se estudió la distribución de las fibras en el plano de falla de cada probeta ensayada de forma cualitativa para analizar la influencia de esta propiedad en el comportamiento mecánico a flexión.

##### **Distribución de fibras hormigón H-B48-4**

La distribución de fibras en el plano de falla de este hormigón en general fue bastante homogénea, pero en la mayoría de las probetas se tuvieron sectores con falta de fibras, como se aprecia en la Figura 25.



**Figura 25. Distribución de fibras tipo hormigón H-B48-4.**

##### **Distribución de fibras hormigón H-B48-6**

En este hormigón la distribución de fibras en general fue homogénea, ver Figura 26, exceptuando en la probeta n° 2 que se tuvo una acumulación de fibras en un sector, ver Figura 27, que influyó de gran manera en su desempeño a flexotracción, aumentando esta resistencia tanto antes como después del agrietamiento. Esto se puede apreciar en los resultados de la Tabla 16 y en la Figura 19 curva esfuerzo-deformación, donde además se observa cuando esta acumulación de fibras falló la resistencia residual disminuyó significativamente.



**Figura 26. Distribución de fibras tipo hormigón H-B48-6.**



**Figura 27. Distribución de fibras probeta n° 2 hormigón H-B48.**

### **Distribución de fibras hormigón H-B48-8**

En este hormigón la distribución de fibras fue homogénea como se puede apreciar en la Figura 28.



**Figura 28. Distribución de fibras tipo hormigón H-B48-8.**

### **Distribución de fibras hormigón H-B57-4**

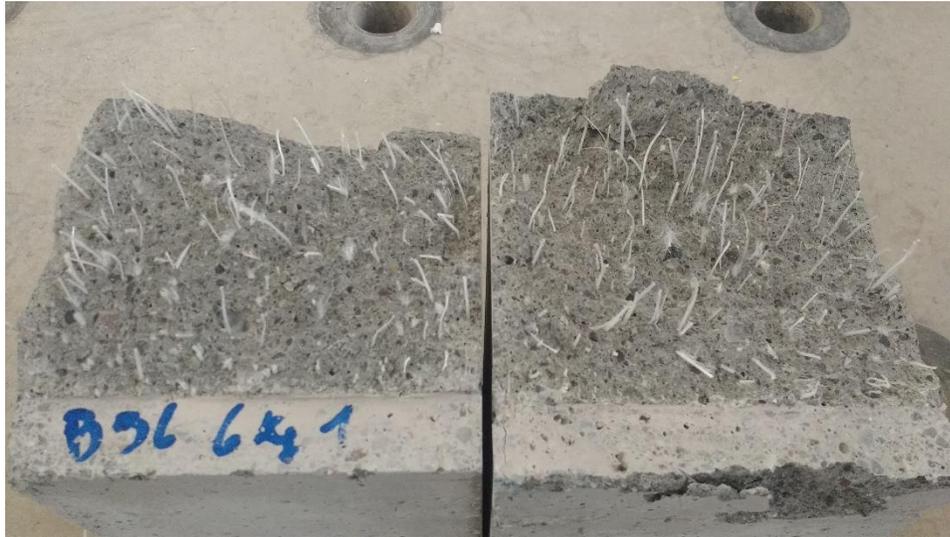
Al igual que en el hormigón H-B48-4, en este se tuvo una distribución de fibras en el plano bastante homogénea, pero con sectores con falta de fibras. La distribución tipo que se tuvo en este hormigón se muestra en la Figura 29.



**Figura 29. Distribución de fibras tipo hormigón H-B57-4.**

### **Distribución de fibras hormigón H-B57-6**

Este hormigón tuvo una distribución de fibras en general homogénea como se puede observar en la Figura 30.



**Figura 30. Distribución de fibras tipo hormigón H-B57-6.**

### **Distribución de fibras hormigón H-B57-8**

La distribución de fibras en este hormigón fue homogénea para todas las probetas confeccionadas. La Figura 31 muestra el plano de fisuración típico que se tuvo en este hormigón.



**Figura 31. Distribución de fibras tipo hormigón H-B57-8.**

En general se tuvo una distribución de fibras en el plano de falla homogénea con más problemas en los hormigones con la menor dosis de fibras (4 kg/m<sup>3</sup> de fibra), esto se puede deber a que como tienen menor cantidad de fibras, es más difícil llenar todos los espacios con éstas. Se pudo apreciar que los hormigones con fibra Barchip Dúctil 57 tuvieron una mejor distribución de fibra para las 3 dosis de fibras distintas que los con la fibra Barchip 48, aunque para poder concluir de mejor forma hacen falta más estudios en este ámbito.

## Capítulo 5. Análisis de Resultados

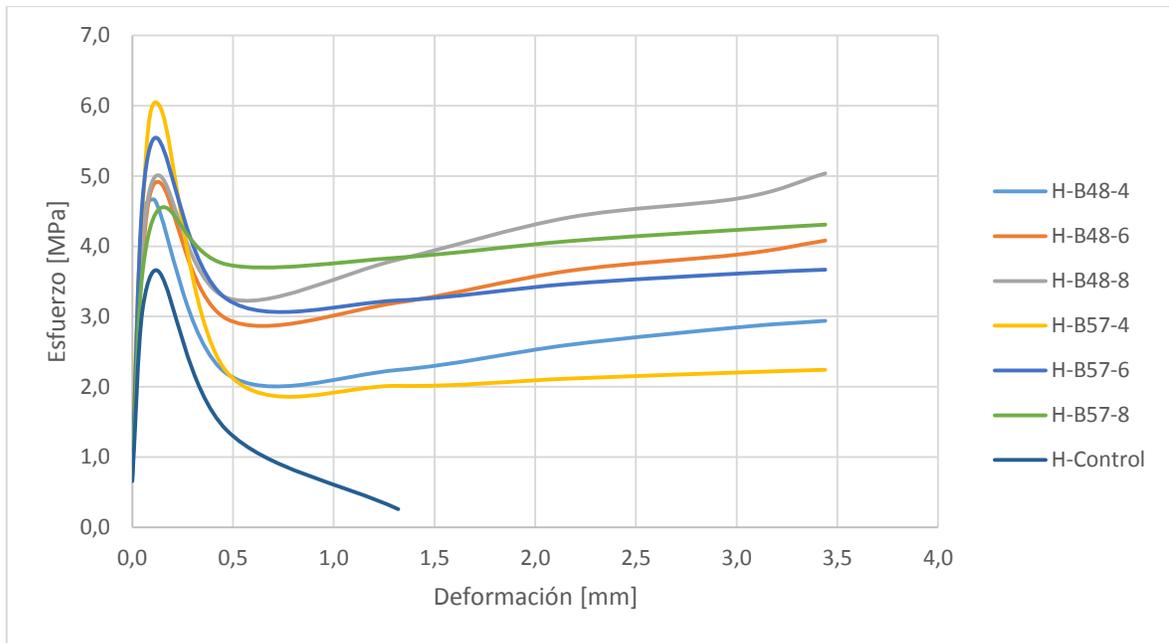
### 5.1. Análisis de resultados obtenidos en laboratorio

De los datos obtenidos en los ensayos a flexión para cada hormigón se promediaron los esfuerzos de cada probeta a diferentes deformaciones. La Tabla 21 muestra el resumen de esfuerzos de los 7 hormigones confeccionados para las deformaciones más importantes.

**Tabla 21. Resultados promedios de resistencia a flexión de los 7 hormigones confeccionados.**

	Esfuerzo flexión [MPa]						C.V.
	LOP	Esfuerzo primer peak	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	
<b>H Control</b>	3,08	3,62	1,38	0,26	-	-	
<b>H-B48-4</b>	4,48	4,65	2,18	2,24	2,60	2,85	18%
<b>H-B48-6</b>	3,85	4,90	2,97	3,20	3,65	3,89	17%
<b>H-B48-8</b>	4,01	5,00	3,27	3,81	4,41	4,69	6%
<b>H-B57-4</b>	4,53	5,98	2,21	2,01	2,12	2,21	15%
<b>H-B57-6</b>	4,63	5,53	3,25	3,23	3,47	3,61	12%
<b>H-B57-8</b>	3,61	4,56	3,74	3,84	4,07	4,24	14%

Las curvas características de todos los hormigones confeccionados para este estudio se muestran en la Figura 32.



**Figura 32. Curvas esfuerzo-deformación de los 7 hormigones confeccionados.**

El primer peak y el LOP de los 6 hormigones con fibras fueron mayores que los del hormigón de control, esto se debe a que las fibras ayudan a controlar las microfisuras que comienzan a aparecer en el rango elástico y luego en el post-fisuramiento. Se puede apreciar como los hormigones confeccionados con fibras siguen tomando carga luego de que el la matriz de hormigón ha fallado, aumentando la ductilidad del compuesto. Las fibras logran aumentar tanto el rango elástico como el post fisuración respecto al hormigón de control.

## Comparación hormigones reforzados con fibra Barchip 48

Las curvas características hormigones reforzados con fibra Barchip 48 se muestran en la Figura 33.

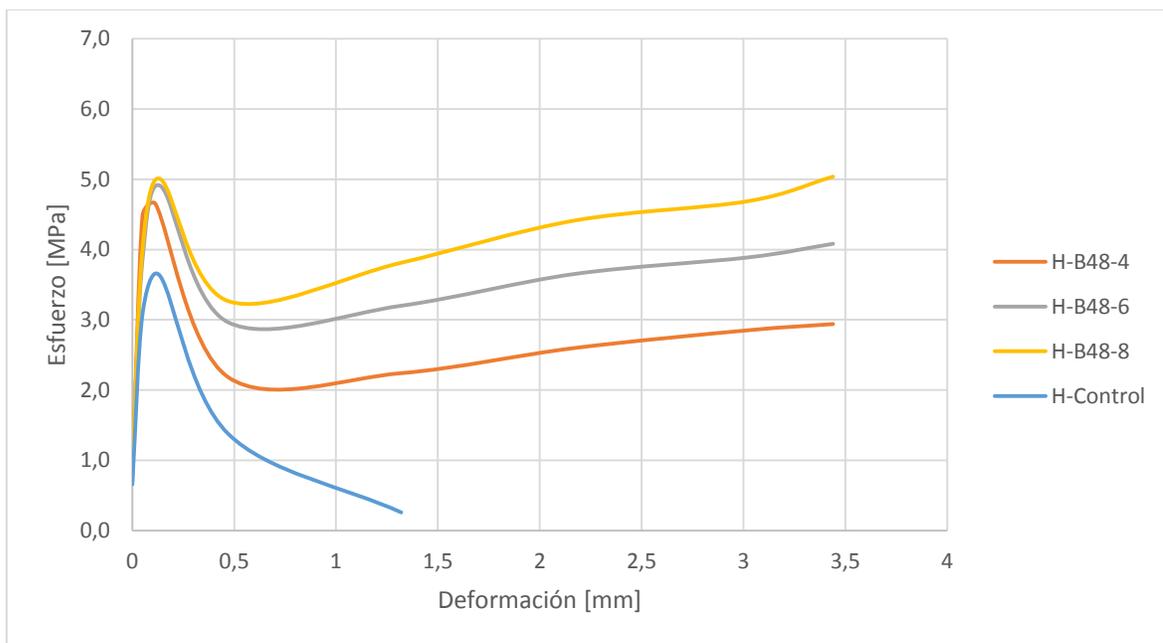
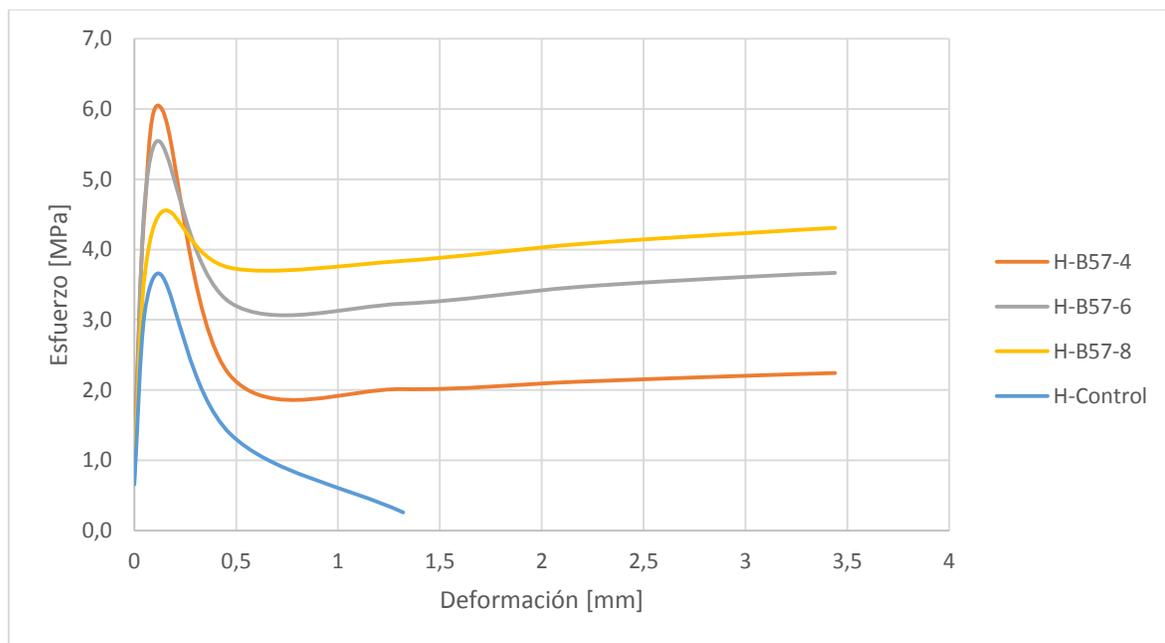


Figura 33. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con fibra Barchip 48 y H-Control.

Se puede observar que al aumentar la cantidad de fibras en el hormigón la resistencia residual (luego de la fractura del hormigón) aumenta, manteniendo un comportamiento lineal luego de los 0,5 mm de deformación. También se observa que al aumentar la deformación estos hormigones comienzan a tomar una carga mayor. Para el caso del hormigón con  $8 \text{ kg/m}^3$  de fibra la resistencia residual al término del ensayo es mayor al LOP e igual a la resistencia en el primer peak. La diferencia en el primer peak que tienen los hormigones reforzados con esta fibra no es significativa, por lo que no es posible saber si la dosis de fibra influye en el esfuerzo de rotura.

## Comparación hormigones reforzados con fibra Barchip Dúctil 57

Las curvas características hormigones reforzados con fibra Barchip Dúctil 57 se muestran en la Figura 34.



**Figura 34. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con fibra Barchip Dúctil 57 y H-Control.**

Al igual que con las fibras Barchip 48, en los hormigones con fibras Barchip Dúctil 57 al aumentar la dosis de fibra la resistencia residual aumenta y luego de los 0,5 mm de deformación presentan un comportamiento lineal. En este caso la resistencia residual al final del ensayo del hormigón con 8 kg/m<sup>3</sup> de fibra es mayor al LOP pero no a la del primer peak. En estos hormigones la dosis de fibra influyó en el esfuerzo que tuvieron en el primer peak, se tuvo una gran diferencia entre los con 4 y 6 kg/m<sup>3</sup> y el con 8 kg/m<sup>3</sup> de fibra, siendo este último el que obtuvo una menor resistencia en el primer peak (coeficiente de variación en el peak menor a 7%). Es posible concluir que para esta fibra la dosis óptima de las 3 que se utilizaron fue la de 6 kg/m<sup>3</sup> de fibra, ya que obtuvo una resistencia peak alta y la diferencia de resistencia post-peak es relativamente baja respecto a la del hormigón reforzado con 8 kg/m<sup>3</sup> de fibra y alta respecto al reforzado con 4 kg/m<sup>3</sup> de fibra.

## Comparación hormigones reforzados con 4 kg/m<sup>3</sup> de fibra

Las curvas características de los hormigones reforzados con 4 kg/m<sup>3</sup> de fibra se muestran en la Figura 35.

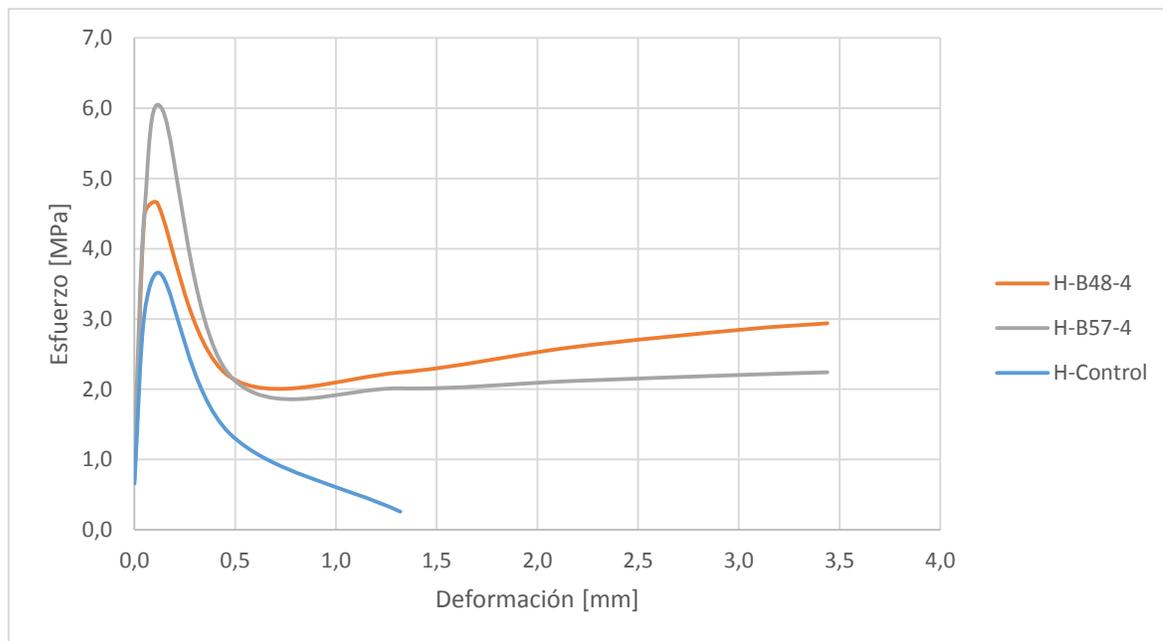
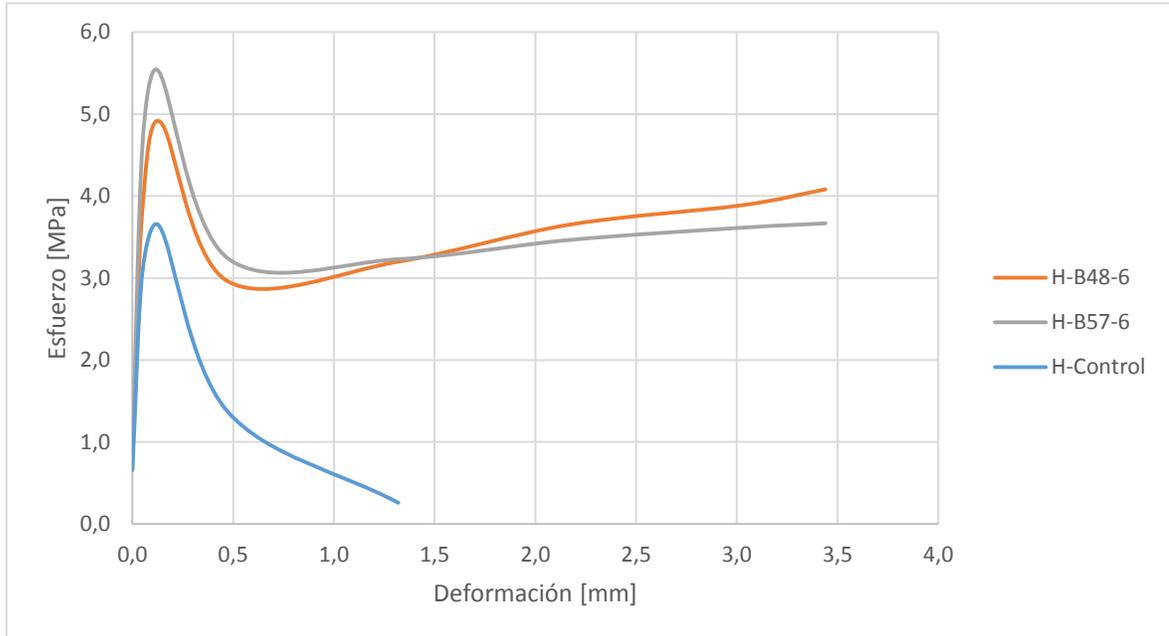


Figura 35. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con 4 kg/m<sup>3</sup> de fibra y H-Control.

Como se observa el hormigón con fibra Barchip Dúctil 57 tuvo un mejor desempeño que el con Barchip 48 hasta los 0,5 mm de deformación, luego de esta deformación el hormigón HB48-4 comenzó a tomar más carga y finalizó el ensayo con una resistencia mayor a la del HB57-4. Esto puede deberse a que aunque este último tenga una fibra de mayor longitud, el HB48-4 tiene una fibra con un mayor relieve, lo que aumenta la adherencia entre las fibras y la matriz cementicia, además la diferencia de área superficial que se tiene entre las dos fibras no es significativa.

## Comparación hormigones reforzados con 6 kg/m<sup>3</sup> de fibra

Las curvas características de los hormigones reforzados con 6 kg/m<sup>3</sup> de fibra se muestran en la Figura 36.

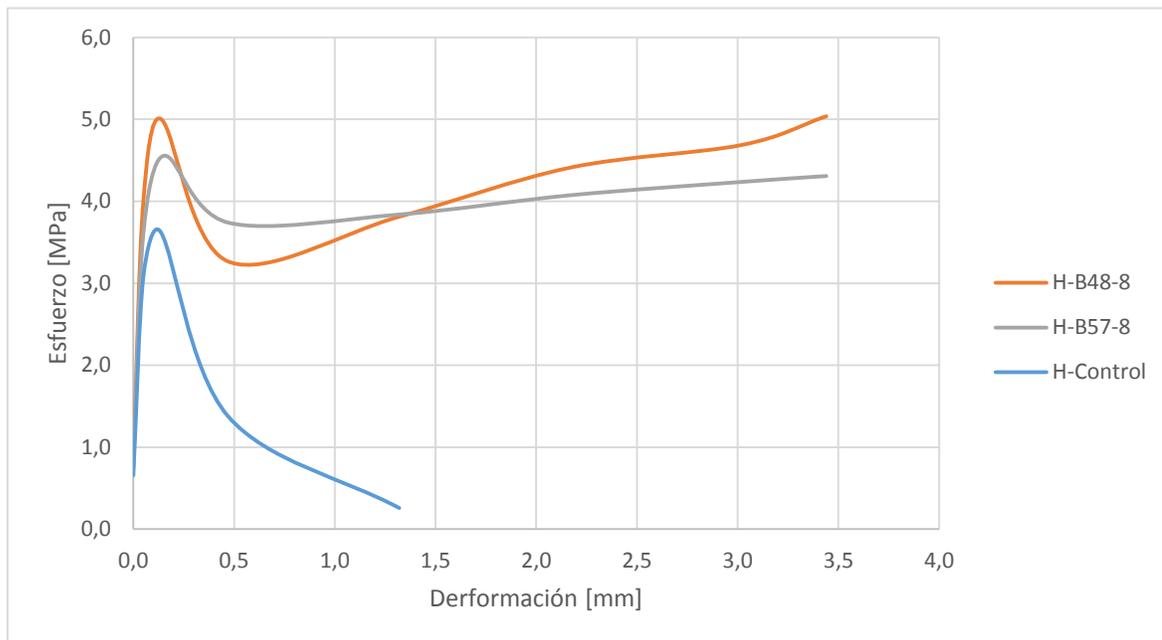


**Figura 36. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con 6 kg/m<sup>3</sup> de fibra y H-Control.**

Al igual que lo que pasó con los hormigones con 4 kg/m<sup>3</sup> de fibra, en los con 6 kg/m<sup>3</sup> fibra fue el hormigón con fibra Barchip Dúctil 57 el que logró una mayor resistencia en los primeros milímetros de deformación y luego el con fibra Barchip 48 comenzó a tomar más carga finalizando con una resistencia mayor al término del ensayo.

## Comparación hormigones reforzados con 8 kg/m<sup>3</sup> de fibra

Las Curvas características de los hormigones reforzados con 8 kg/m<sup>3</sup> de fibra se muestran la Figura 37.



**Figura 37. Curvas esfuerzo-deformación hormigones reforzados con 8 kg/m<sup>3</sup> de fibra y H-Control.**

En este caso el hormigón con fibra Barchip 48 tuvo una mayor resistencia en el primer peak, al contrario que lo sucedido en los hormigones con 4 y 6 kg/m<sup>3</sup> de fibra. Pero la curva descendente luego de este peak en el hormigón con Barchip Dúctil 57 fue más suave que el con Barchip 48, logrando un mayor desempeño entre los 0,25 y 1,3 mm de deformación, luego de esto el hormigón HB48-8 comenzó a tomar más carga finalizando ensayo con una resistencia mayor al igual que con las 2 dosis anteriormente vistas.

Los hormigones con fibra Barchip 48 tuvieron una mayor pendiente carga/deformación luego de la curva descendente post agrietamiento, lo significa que en estos hormigones para aumentar una misma cantidad deformación necesitan más carga que los hormigones con fibra Barchip Dúctil 57, lo que puede deberse debido a que tienen un mayor relieve, por lo tanto una mayor adherencia.

## 5.2. Tenacidad

La tenacidad es la capacidad que tiene el hormigón de absorber energía, y que se ve aumentada en hormigones reforzados con fibras. Se obtiene calculando el área bajo la curva carga-deformación. Es una propiedad interesante de estudiar para realizar comparaciones entre hormigones reforzados con distintas fibras y dosificaciones de éstas (12).

Aunque la norma EN 14651 (24) con la que fueron ensayadas las probetas no se tiene la opción de calcular la tenacidad de los hormigones, fue posible obtener ésta, simplemente calculando el área bajo la curva de los gráficos carga-deformación de cada hormigón. Las curvas de tenacidad se muestran en la Figura 38.

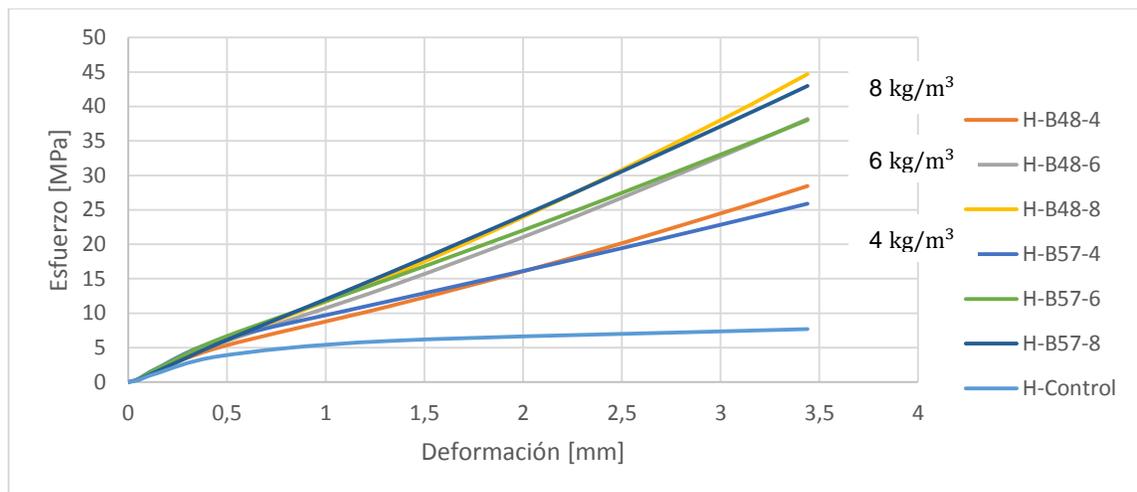


Figura 38. Curvas de tenacidad (energía-deformación) de los 7 hormigones confeccionados.

Las fibras aumentaron en gran medida la tenacidad del hormigón, haciendo un compuesto más dúctil respecto al hormigón sin fibras.

Se observa que al aumentar la dosis de fibra la tenacidad aumenta, esto se debe a que al tener una mayor cantidad de fibras, éstas pueden absorber una mayor cantidad de energía. Aunque se aprecia una diferencia de tenacidad entre los hormigones con una misma dosis de fibra, siendo los con fibra Barchip 48 los que logran una mayor cantidad de energía absorbida, esta diferencia no es muy significativa. Hasta una deformación de 0,5 mm tampoco existe una diferencia significativa de tenacidad entre los hormigones reforzados con fibra.

### 5.3. Función estructural de las fibras en el hormigón

De acuerdo Artículo 31.4 “Valor mínimo de las resistencias” del Anejo 14 “Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras” de la norma española EHE 08, para que las fibras puedan ser consideradas con función estructural la resistencia característica residual a tracción por flexión  $f_{R,1}$  no será inferior al 40% del límite de proporcionalidad (LOP) y  $f_{R,3}$  no será inferior al 20% (1). La Tabla 22 muestra el porcentaje de resistencia de  $f_{R,1}$  y  $f_{R,3}$  respecto del límite de proporcionalidad

Fibras pueden considerarse con función estructural si:

$$\frac{f_{R,1}}{LOP} \geq 40\% \text{ y } \frac{f_{R,3}}{LOP} \geq 20\%$$

**Tabla 22. Porcentajes de resistencia de  $f_{R,1}$  y  $f_{R,3}$  respecto del LOP de los 6 hormigones reforzados con fibras.**

	$\frac{f_{R,1}}{LOP}$	$\frac{f_{R,3}}{LOP}$
H-B48-4	49%	58%
H-B48-6	77%	95%
H-B48-8	82%	110%
H-B57-4	49%	47%
H-B57-6	70%	75%
H-B57-8	104%	113%

Los valores de resistencia residual por tracción de los 6 hormigones confeccionados con fibras cumplen el artículo mencionado anteriormente, por lo que estos pueden considerarse con función estructural.

Otra consideración que se puede hacer respecto a la dosis de fibra es que los hormigones con una cierta cantidad de fibra incorporada deben cumplir con una resistencia residual igual o mayor a 1,5 Mpa a un CMOD de 0,5 mm (equivalente a una deflexión central de 0,47 mm) y una resistencia residual igual o mayor a 1,0 Mpa a un CMOD de 3,5 mm (equivalente a una deflexión central de 3,02 mm) (13). Lo que se cumple para todos los hormigones reforzados con fibra confeccionados en este estudio.

De acuerdo al MC-2010 (26) los hormigones reforzados con fibras pueden ser clasificados según su intervalo de resistencia y proporción de resistencias residuales de la siguiente forma.

Se emplean los valores de resistencia representativos de condiciones de servicio ( $f_{R1k}$ ) y últimas ( $f_{R3k}$ ) en MPa:

- HRF es estructural si:
 
$$f_{R1k}/f_{Lk} > 0.4$$

$$f_{R3k}/f_{R1k} > 0.5$$
- $f_{R1k}$  define intervalo de resistencia: 1.0-1.5-2.0-3.0-4.0-5.0-6.0-7.0-8.0. [MPa]
- Letra (a, b, c, d, e) define la proporción de resistencias residuales:
  - a) Si  $0,5 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 0,7$ , corresponde a un reblandecimiento intenso.
  - b) Si  $0,7 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 0,9$ , corresponde a un reblandecimiento ligero.
  - c) Si  $0,9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 1,1$ , corresponde a plástico perfecto.
  - d) Si  $1,1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 1,3$ , corresponde a un endurecimiento ligero.
  - e) Si  $1,3 \leq f_{R3k}/f_{R1k}$ , corresponde a un endurecimiento intenso.

Se usarán los valores promedios de resistencia de cada hormigón como los valores característicos para clasificar los hormigones confeccionados de acuerdo lo señalado anteriormente. La Tabla 23 se muestra los datos usados para clasificar cada hormigón y su correspondiente clasificación.

**Tabla 23. Clasificación de hormigones según MC-2010 (26).**

	$f_{R,1}$	$\frac{f_{R,1}}{LOP}$	$\frac{f_{R,3}}{f_{R,1}}$	Clase
H-B48-4	2,18	0,49	1,19	2.0 d
H-B48-6	2,97	0,77	1,23	2.5 d
H-B48-8	3,27	0,82	1,35	3.0 d
H-B57-4	2,21	0,49	0,96	2.0 c
H-B57-6	3,25	0,70	1,07	3.0 c
H-B57-8	3,74	1,04	1,09	3.0 c

Como se muestra en la Tabla 23 los hormigones reforzados con fibra Barchip 48 tuvieron un comportamiento con endurecimiento ligero, mientras que los reforzados con Barchip Dúctil 57 se comportaron de manera plástica perfecta, pero ambos cumpliendo con función estructural.

## 5.4. Potenciales aplicaciones

Para dosis de fibras bajo el límite máximo obtenido en 4.2 ( $4 \text{ kg/m}^3$  de fibra), este tipo de hormigones podría ser utilizado en gran parte de los proyectos que requieran de un HAC, mejorando así su desempeño estructural tanto en el rango elástico como post-fisuración.

También se podría evaluar su utilización en elementos en los cuales es necesario utilizar un HAC y poseen cuantías bajas de armadura, donde se podría estudiar la factibilidad del reemplazo total de la armadura por fibra. En este caso se podrían elevar las dosis de fibra por sobre el límite considerado ( $4 \text{ kg/m}^3$  de fibra).

En elementos que por diseño requieran una alta cuantía de armadura y que por esto se dificulte el hormigonado, puede evaluarse la factibilidad de disminuir la cuantía de armadura al considerar el aporte resistente de las fibras, para lo que se debe tener en cuenta la dosis de fibra y el espaciamiento entre la armadura, para que no se forme un bloqueo debido a las fibras.

## Capítulo 6. Conclusiones

Como mostraron los ensayos en estado fresco fue posible confeccionar hormigones autocompactantes reforzados con fibras, con adecuada capacidad de relleno y resistencia a la segregación, sin embargo las dosis de fibra incorporada condiciona la capacidad de paso a través de armaduras. Para las fibras estudiadas se obtuvo un límite máximo de fibras para el cual es aceptable su capacidad de paso (4 kg/m<sup>3</sup> de fibra).

La distribución de las fibras en el plano de falla en general fue homogénea, con algunas excepciones aisladas donde se perdió levemente esta homogeneidad, pero que no influyó en el desempeño mecánico de los hormigones.

Al evaluar la resistencia a compresión de los hormigones reforzados con fibras a distintas dosis no se observó una diferencia significativa, por lo que no es posible concluir si la incorporación de fibras influye o no en esta propiedad. El mayor efecto de la incorporación de fibras se ve reflejado al evaluar su comportamiento a tracción por flexión, tanto en el rango elástico como en el comportamiento post-fisuración.

En los ensayos realizados a flexotracción se vio que las fibras aumentan la resistencia, tanto antes como después del agrietamiento del hormigón respecto a uno convencional, además es capaz de tolerar significativamente mayores deformaciones, aumentando así su capacidad de absorber energía. Se pudo observar también que al aumentar la dosis de fibra la resistencia de estos hormigones igualmente crece, así como también su tenacidad.

Los hormigones reforzados con fibra Barchip Dúctil 57 tuvieron un mejor desempeño en los en el rango elástico respecto a los reforzados con fibra Barchip 48, pero que a deformaciones mayores mantuvieron relativamente constante su resistencia, no así los hormigones con fibra Barchip 48, en el rango post-fisuración aumentaron su resistencia, logrando un mejor desempeño en esta fase.

Se abre la posibilidad del uso de este tipo de hormigones en diversos elementos estructurales, desde el reemplazo total de armadura en elementos con bajas cuantías y formas que dificulten su hormigonado o el reemplazo parcial de armaduras en elementos con cuantías altas que requieran el uso de un hormigón autocompactante,

siempre tomando en cuenta la capacidad de paso que deben tener este tipo de hormigones, la que estará condicionada por las características y dosis de las fibras y el espaciamiento entre las armaduras.

## Bibliografía

1. MELIÁN, G.; BARLUENGA, G.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Aumento de la tenacidad de hormigones autocompactables reforzados con fibras cortas de polipropileno. *Materiales de construcción*, 2010, vol. 60, no 300, p. 83-97.
2. ZERBINO R. 2012. Hormigón autocompactante reforzado con fibras. En: I SIMPÓSIO LATINOAMERICANO SOBRE CONCRETO AUTODENSABLE. Maseió, Brasil. IBRACON. 27p.
3. CUENCA ASENSIO, Estefanía. Comportamiento a cortante de elementos constructivos fabricados con hormigón autocompactante y hormigón reforzado con fibras. 2011.
4. GENCEL, Ozel, et al. Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. *Materials Research Innovations*, 2011, vol. 15, no 3, p. 216-225.
5. MÁRMOL SALAZAR, Patricia Cristina. *Hormigones con fibras de acero características mecánicas*. 2010. Tesis Doctoral. Caminos.
6. E.E.U.U. ASTM. 2004. Standard 1116-03. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete, noviembre, 2004. 8p.
7. CONCRETE HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS, SIKA. 2015. Santiago, Chile. 24p.
8. BERTOLINO, Graciela, et al. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS SOMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS. 2014.
9. SAPHIER, Alfonso. 2006. Investigación de la orientación de las fibras de acero en hormigón autocompactante. Tesis de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 106p.
10. EUROPA. BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC. 2005. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Produce and Use. Mayo, 2005. 68p.
11. MACCAFERRI. 2007. Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón Manual Técnico. Brasil. 239p.
12. ÁVILA, José Castañeda, et al. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO HIDRÁULICO SIMPLE Y EL REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO. *Revista Ingeniería de Construcción*, 2011, vol. 15, no 1, p. 20-27.
13. CHIOMA V., P. 2009. Comportamiento mecánico a escala real de un piso industrial de hormigón reforzado con fibras sintéticas. En: EXPO HORMIGÓN, Santiago, Chile. Instituto Chileno del Hormigón. 38p.

### **Normativas utilizadas en este estudio:**

14. NCh 148. Of.68. Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales
15. NCh 165 Of.52. Determinación colorimétrica de la presencia de impurezas orgánicas en las arenas para hormigones
16. NCh 1116 Of. 77 Determinación de las densidades aparentes.
17. NCh 1239 Of. 77 Determinación de las densidades real y neta, y la absorción de agua.
18. NCh 1223 Of. 77 Determinación del contenido de materiales finos menores a 0,08 [mm].
19. NCh 2182 Of.95. Hormigón y Mortero - Aditivos – Clasificación y requisitos.
20. NCh 1037 Of. 77. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.
21. ASTM C595-09. Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos
22. ASTM C1157-11. Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico.
23. EN 12350. Testing Fresh Concrete.
24. EN 14651. Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
25. EN 12390. Testing Hardened Concrete.
26. EUROPA. Fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete. 2010. The fib Model Code for Concrete Structures 2010.