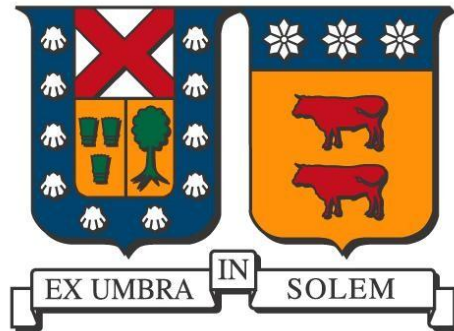


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAISO - CHILE



**CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES REFORZADOS CON ALTAS CUANTIAS DE FIBRAS  
SINTETICAS**

Memoria de titulación presentada por

**PEDRO PABLO CASTRO CONTRERAS**

Como requisito parcial para optar al título de

**CONSTRUCTOR CIVIL**

Profesor Guía

**SERGIO CARMONA MALATESTA**

Profesor Revisor

**EDUARDO SANCHEZ  
ANTONIO AGUILAR**

ENERO 2017

## Resumen

Las aplicaciones de los hormigones reforzados han dado resultados muy positivos en el estado post fisuración del hormigón, así como en la resistencia residual que este obtiene, es por esto que en los últimos años el estudio de su comportamiento y pruebas de laboratorio, se ha desarrollado ampliamente.

Una de las ventajas comparativas de las macro fibras es su bajo peso, alcanzando a más de 45000 fibras por kilogramo, constituyendo un refuerzo ampliamente distribuido en la masa de hormigón, con una baja sustitución volumétrica. Esto ha permitido que hormigones reforzados con dosis relativamente bajas las fibras sintéticas cumplan con los requisitos para ser clasificados como materiales estructurales, de acuerdo a los criterios establecidos en el Código Modelo del Comité Euro-Internacional del Hormigón. No, obstante, el uso de dosis relativamente altas de fibras sintéticas produce disminuciones de trabajabilidad y mayor presencia de oquedades en el hormigón.

El objetivo de esta memoria es caracterizar las propiedades en estado fresco y endurecido de hormigones reforzados con altas dosis de fibras sintéticas.

Para lograr el objetivo propuesto, se prepararon hormigones reforzados con  $12 \text{ kg/m}^3$  de fibras sintéticas, con los que se moldearon probetas para determinar la tenacidad y resistencias residuales de acuerdo a los procedimientos establecidos en las normas EN 14651, ASTM C 1609 y UNE 83515. Los resultados obtenidos se compararan con datos disponibles de otras investigaciones realizadas con hormigones reforzados con menores dosis de fibras.

Tanto, en la comparación de ensayos ASTM C 1609 como EN 14651, la cuantía de  $12 \text{ kg/m}^3$  supera a las menores en tenacidad y resistencia residual en las probetas ensayadas, esto permite concluir que para esta dosificación, dicha cantidad de fibra tiene un comportamiento considerablemente más dúctil por lo que consigue un mejor comportamiento esperado en vigas post-fisuración. En el ensayo UNE 83515 se presenta una diferencia de un 13% de la resistencia residual entre las últimas cuantías por lo tanto a esta escala el aumento de cuantía de fibras es despreciable. De los valores de tenacidad se obtiene que, aumenten en función de la cuantía, por lo que concuerda con lo presentado en los otros ensayos.

Por otro lado la trabajabilidad del hormigón es inversamente proporcional a la cantidad de fibra adicionada a la mezcla, no obstante, la adición de aditivo permite mejorar esta característica. Esta memoria se enmarca en el desarrollo del Proyecto Fondecyt N°1150881.

## Abstract

The applications of reinforced concrete have produced very positive results in the post cracking of concrete state, as well as the residual resistance that this gets, which is why in recent years the study of their behavior and laboratory tests has been developed widely.

One of the comparative advantages of the macro fibers is their low weight, reaching more than 45,000 fibers per kilogram, constituting a widely distributed reinforcement in the concrete mass, with low volume replacement. This has allowed concrete reinforced with relatively low doses of synthetic fibers meet the criteria to be classified as structural materials, according to the criteria set out in the Model Code Euro-International Concrete Committee. Not, however, the use of relatively high doses of synthetic fibers produces decreases in workability and presence of voids in the concrete.

The objective of this report is to characterize the properties of fresh and hardened concrete reinforced with high doses of synthetic fibers.

To achieve the objective, concrete reinforced with 12 kg/m<sup>3</sup> of synthetic fibers with which specimens be molded to determine the tenacity and residual resistance in accordance with the procedures set out in EN 14651, ASTM C 1609 is prepared and UNE 83515 . The results were compared with data available from other research with reinforced concrete with lower doses of fibers.

Thus, in comparing assays ASTM C 1609 and EN 14651, the amount of 12 kg / m<sup>3</sup> beats lower in toughness and residual strength in the specimens tested, the conclusion is that this dosage, said quantity of fiber has a behavior considerably more ductile so it gets a better performance expected in post-cracking beams. In the test UNE 83515 it presents a difference of a 13% residual strength between the last amounts therefore this scale increased amount of fibers is negligible. Tenacity values obtained that increase depending on the amount, so consistent with what is presented in the other trials.

Furthermore the workability of concrete is inversely proportional to the amount of fiber added to the mixture, however, the addition of additive improves this feature. This memory is part of the development of Fondecyt N° 1150881.

## Glosario

- **HRF (Hormigón Reforzado con Fibras):** Hormigón que incluye en su composición fibras aleatoriamente distribuidas en su masa; para mejorar algunas propiedades específicas de éste.
- **Resistencia Residual:** Resistencia correspondiente a un estado post –fisuración.
- **Tenacidad:** Energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura o la capacidad de un material de oponerse a la propagación de la fisuración disipando energía de deformación.
- **CMOD:** Crack Mouth Opening Displacement. Desplazamiento apertura de fisura. (Vigas)
- **TCOD:** Total Circumferential Opening Displacement. Desplazamiento total apertura circunferencial. (Cilindros BCN)
- **Ensayo BCN:** Ensayo Barcelona o doble punzonamiento más cadena de extensómetro.
- **Ductilidad:** Capacidad de un material de poder soportar apreciables deformaciones conservando buena resistencia.
- **FRC:** Fiber Reinforced Concrete. Fibra Plástica.
- **SFRC:** Steel Fiber Reinforced Concrete. Fibra Metálica.
- **Árido:** Material pétreo compuesto de partículas dura, de forma y tamaño estable.
- **Arena (Árido Fino):** Árido que pasa por tamiz de abertura nominal de 5 mm y es retenido en el 0,080 mm con tolerancias establecidas en la presente norma.
- **Grava (Árido Grueso):** Árido retenido en el tamiz de abertura nominal de 5 mm con las tolerancias en la tabla 3 de la norma NCh 163 Of. 1979.
- **Poros:** Espacios vacíos interiores de una partícula grano de árido.
- **Poros Accesible:** Poro Permeable o abierto.
- **Poros Inaccesible:** Poro Impermeable o cerrado.
- **Densidad:** Cociente entre la masa ( $m$ ) de una sustancia y su volumen ( $v$ ) a una temperatura específica. Se expresa en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- **Densidad Real:** Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas del árido, más el volumen de los poros accesibles de esas partículas.
- **Densidad Real del Árido Seco:** Densidad real en que se considera solamente la masa del árido seco.
- **Densidad Real del Árido Saturado Superficialmente Seco:** Densidad real en que se considera la masa del árido seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.
- **Densidad Neta:** Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas más el volumen de los poros inaccesibles.
- **Densidad Aparente (Densidad a granel, Densidad Bruta):** Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de un árido, más el volumen de los poros y de los huecos. Este volumen corresponde a la capacidad de la medida que lo contiene.
- **Densidad Aparente Compactada:** Densidad aparente del árido compactado en la medida según los procedimientos indicados en esta norma.

- **Densidad Aparente Suelta:** Densidad del árido vaciado en la medida según el procedimiento indicado en norma NCh 1116 Of. 1977.
- **Absorción de Agua:** Masa de agua necesaria para llevar un árido de estado seco a estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje del árido secado en estufa hasta masa constante.
- **Secado Hasta Masa Constante:** Limite de secado en que dos pesadas sucesivas separadas por una hora de secado, difieren en un porcentaje igual o inferior al 0,1% de la menos masa determinada.
- **Granulometría de un Árido:** Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido, determinada de acuerdo con NCh. 165.
- **Tamaño Máximo Absoluto de un Árido (Da):** Corresponde a la abertura del menor tamiz de las series establecidas en NCh. 165, que deja pasar el 100 % de la masa del árido.
- **Tamaño Máximo Nominal de un Árido (Dn):** Corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor que Da, cuando por dicho tamiz pase el 90% o más de la masa de un árido. Cuando pasa menos del 90% el tamaño máximo nominal se considera igual al tamaño máximo absoluto.

## Contenido

Resumen.....	i
Abstract .....	ii
Glosario .....	iii
Contenido.....	iv
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodología General .....	2
Capítulo 2. Marco Teórico.....	3
2.1. Hormigón Reforzado con Fibras (HRF).....	3
2.2. Fibra Sintética BarChip 54 .....	4
2.3. Aplicaciones.....	6
Capítulo 3. Investigación Propuesta.....	8
3.1. Ensayos .....	8
3.2. Ensayo de viga Norma ASTM C-1609 .....	9
3.3. Ensayo de viga Norma EN 14651 .....	11
3.4. Ensayo de doble punzonamiento Norma UNE 83515 (BCN) .....	13
Capítulo 4. Desarrollo Experimental .....	16
4.1. Granulometría .....	16
4.2. Confección del hormigón .....	17
4.3. Nomenclatura.....	19
Capítulo 5. Calculo y Análisis .....	20
5.1. Calculo de viga Norma EN 14651 .....	20
5.2. Calculo de viga Norma ASTM C-1609.....	22
5.3. Correlación de Ensayos de viga Norma ASTM C-1609 y EN 14651 .....	24
5.4. Calculo de doble punzonamiento Norma UNE 83515 (BCN) .....	28
Capítulo 6. Conclusiones .....	32
Capítulo 7. Anexos.....	34
Capítulo 8. Referencias .....	39

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

En la industria de la construcción el uso del hormigón reforzado con fibra ha generado un gran desarrollo impulsado en la tecnología que le entrega al integrar este agregado, el cual puede ser de distintos materiales ( metálicos, vítreos y sintéticos) que incrementan en gran medida la resistencia del material, aportándole una mayor tenacidad y mejorando su comportamiento mecánico.

En esta presentación se trabaja con fibras sintéticas, las cuales permiten a los hormigones mayores prestaciones, aumentando su módulo de elasticidad con estructuras más ligeras y mejorando su resistencia a la tracción. En el último tiempo se ha estado usando mucho en obras de pavimentación y en la construcción de túneles, debido a su resistencia a los impactos y la prevención o reacción a las posibles fisuras.

En el estado post-agrietamiento es donde el hormigón con fibra aporta en gran medida, debido a otorga una resistencia a la tracción y a la flexión, funcionando como agarre entre fisuras y evitando que estas se abran bruscamente una vez que el hormigón ya ha perdido su aporte estructural.

Para conocer la magnitud del aporte que otorgan las fibras sintéticas se deben someter a ensayos de tracción indirecta o flexo tracción, posteriormente a la fisuración de grietas, debido a que previo a esta fisuración solo es un aditivo más a la mezcla sin aporte de resistencia.

Entre todos los ensayos que se realizan para el estudio de hormigones en general y en específico con agregado de fibras sintéticas, estudiaremos los más representativos a lo largo de las últimas décadas, los cuales son, EN 14651, ASTM C 1609 y UNE 83515; se hará una comparación entre ellos y un análisis individual para la cuantía de fibra que le presentamos.

A grandes rasgos la norma ASTM C 1609 (2007), especifica el ensayo de flexión con carga a los tercios, sobre probetas sin entalla, y la tenacidad es cuantificada a través de los índices de tenacidad y de resistencia a la primera fisura de los HRF.

El ensayo EN 14651 (CEN, 2005), se controla a través del desplazamiento de apertura de los bordes de la fisura (CMOD por el inglés Crack Mouth Opening Displacement), que asegura una propagación estable de la fisura en un sistema con control por lazo cerrado (Closed-loop control), incluso para hormigón en masa. La curva carga – CMOD o bien la carga – deflexión obtenidas a través de él pueden ser usadas para calcular las relaciones tensión – deformación o tensión - ancho de fisura y, de este modo, evaluar el efecto de la incorporación de las fibras.

Otro método para la caracterización de los HRF es que se ha adaptado el ensayo de doble punzonamiento; por AENOR; al ensayo Barcelona bajo la norma española UNE 83 – 515 (2010). En este ensayo las probetas son cilíndricas y de tamaño reducido lo que permite a su vez obtener testigos; el método de ensayo requiere básicamente de una prensa de compresión con que adopte la velocidad de aplicación de carga y sus resultados presentan una baja dispersión.

## 1.2 Objetivos

Se desarrollará un trabajo experimental en el cual se confeccionarán probetas de hormigón reforzado con fibras sintéticas (BarChip 54) con una cuantía de  $12 \text{ kg/m}^3$  y se compararan con otros resultados obtenidos con la misma fibra, pero con cuantías de  $4 \text{ kg/m}^3$  y  $8 \text{ kg/m}^3$ , todas estas probetas se ensayarán posteriormente a los 28 días aproximadamente.

La resistencia residual y la tenacidad de cada probeta, se obtienen por medio de los transductores los cuales entregan un valor de *CMOD* característico, el cual se puede comparar entre las distintas normas y entre las diferentes cuantías de fibras.

## 1.3 Metodología General

Primeramente se obtienen los materiales para poder realizar las probetas pertinentes, la composición de estos debe cumplir ciertas normas y requisitos en cuanto a calidad de los áridos y de cada uno de los componentes que van inmersos en las mezclas de estado fresco, la cual será explicada específicamente posteriormente en el *capítulo 4*.

Luego se debe generar las condiciones de laboratorio, para la realización del número de probetas a estudiar y ensayar, contando con una programación adecuada a la cantidad de moldes que se tienen, la disponibilidad de almacenamiento, requerimiento y calidad de materiales, como de los tiempos de curado y coordinación para poder ensayarlos en el día que adquieran la misma resistencia, *capítulo 4*.

El siguiente paso es disponer del software y maquinaria correspondiente para realizar los 3 tipos de ensayos, con esto se procede a ensayar, considerando el comportamiento de los gráficos, cantidad de fibras que se observan al terminar el ensayo y midiendo distancias de fisuras respecto al centro de la viga, para posteriores cálculos y análisis, *capítulo 3*.

Finalmente y antes de concluir, se deben realizar cálculos y comparaciones para obtener los *CMOD* respectivos y correspondientes para la homologación y cruce entre normas y cantidad de fibras en su estado post – fisuración, *capítulo 5*.

## Capítulo 2. Marco Teórico

### 2.1 Hormigón Reforzado con Fibras

El hormigón acompañado de la incorporación de fibras a la mezcla ha evolucionado positivamente en las últimas décadas y se desarrolló rápidamente al cambiar las características de estas fibras, junto con la incorporación de aditivos que disminuyeran la cantidad de agua en la mezcla.

El hormigón, es un material compuesto formado por una matriz cementicia que envuelve y liga un esqueleto mineral constituido por los agregados. Debido a su naturaleza el hormigón presenta una serie de defectos y fisuras internas. El comportamiento del hormigón frente a diferentes condiciones de carga está regido por la propagación de esos defectos y fisuras.

Cuando una fisura se propaga, surgen una serie de mecanismos que se oponen a su avance, denominándose a este efecto aumento de la tenacidad. El mecanismo más efectivo es el puente de fisura, en este caso la fisura es frenada cuando se encuentra con una partícula relativamente resistente, por ejemplo, una pieza de grava, una barra de acero o una fibra.

Con el conocimiento adquirido en la últimas décadas y los avances en normativas, ensayos y guías de diseño el concepto de HRF hoy es entendido como un material compuesto, y su desempeño obedece a un conjunto de materiales que lo componen entre los que se encuentran las fibras.

Es muy importante entender que existen parámetros mínimos que debe cumplir un HRF de acuerdo a las normativas e información de diseño, para ser considerado como estructural. Por esta razón, es que al momento de elegir una fibra debe saber que existen de diferentes materiales y calidad de los mismos.

La fibra incorporada en la mezcla es considerada como un árido, sin embargo no aporta a la resistencia característica del hormigón aunque si dependiendo de la cantidad de fibra que se utilice puede aumentarla. Pero es en el estado post – fisuración donde se ve reflejado el aporte que éstas hacen; limitan la apertura de fisuras, mejoran la tenacidad y el control de proceso de fisuración y resistencia a la flexotracción.

Las fibras pueden presentarse en distintas formas, tamaños y materialidad. Estos parámetros; en conjunto con la cantidad de fibra utilizada y sus propias características mecánicas; determinan el comportamiento del HRF y su acción reforzante. Una clasificación se puede interpretar de la siguiente manera:

- **Clasificación según el material:**

Polipropileno y/o polipropileno de alta densidad, Aramida, Alcohol de polivinilo, Acrílico, Nylon, Poliester

- **Clasificación Según el proceso de fabricación:**

Monofilamentos extruidos (Tipo I), Láminas fibriladas (Tipo II)

- **Clasificación según las dimensiones:**

Micro-fibras : < 0,20 mm diámetro

Macro-fibras: ≥ 0,20 mm diámetro

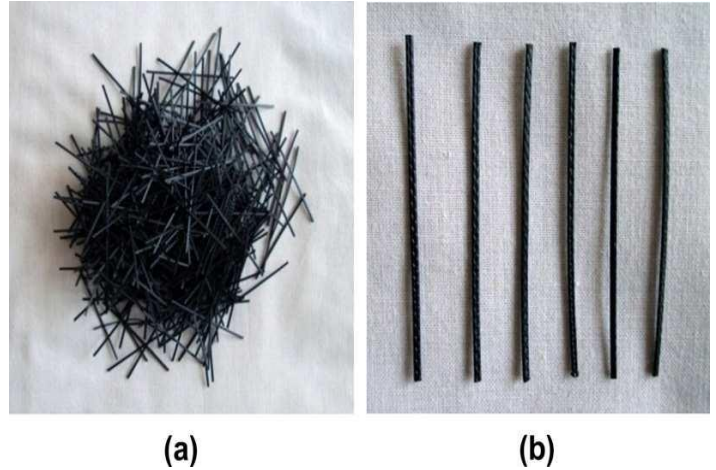
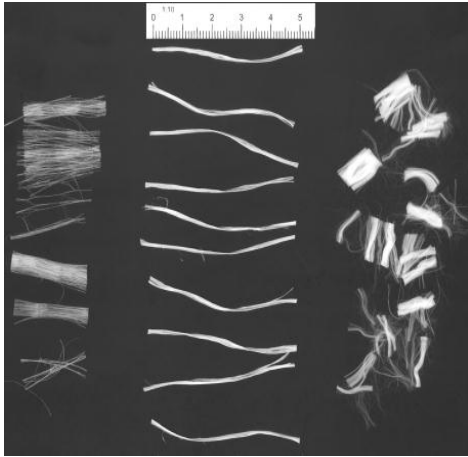


Imagen 2.1). Distintas tipologías de fibras sintéticas (Chioma, 2009).

- **Clasificación según el proceso de fabricación:**

Trefiladas (Tipo I), Cortadas en láminas (Tipo II), Extraídas por rascado en caliente (Tipo III), Otras, p.e.: fibras de acero fundido (Tipo IV)

- **Clasificación según la forma:**

Rectas, onduladas corrugadas, conformadas en extremos de distinta forma. Se recomienda que:  $l_f \geq 2 t_{máx}$  (Usual entre 2,5 a 3)

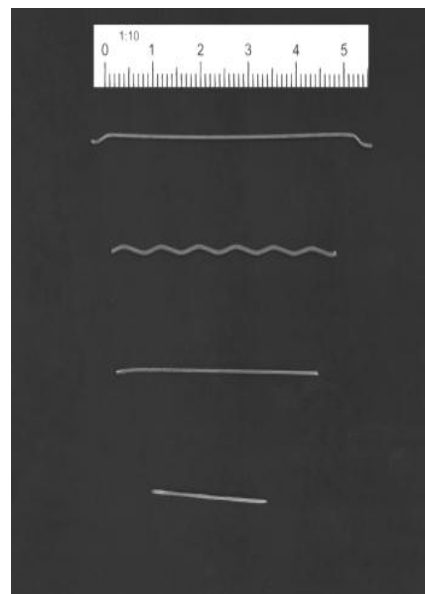
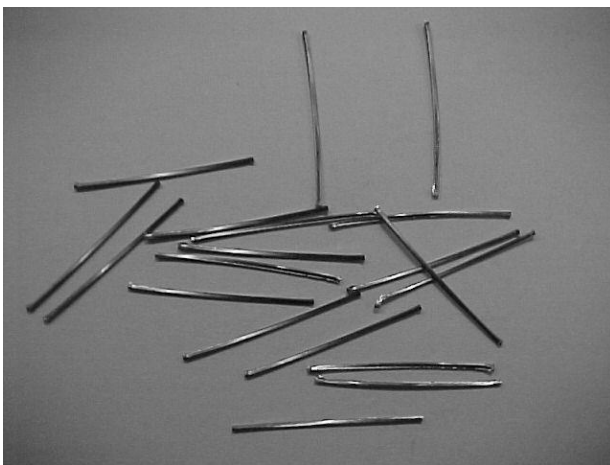


Imagen 2.2). Distintas tipologías de fibras metálicas. (Chioma, 2009).

En el presente estudio se analizara el comportamiento de la fibra sintética denominada BarChip54, relacionando las diferentes características de las probetas en la dinámica mencionada anteriormente.

## 2.2 Fibra sintética BarChip 54

BarChip54 es una fibra estructural de última generación de EPC (elasto plastic concrete) programa de investigación sobre la fibra. Su diseño tiene facilidad de uso, durabilidad y servicio de actuación. Es adecuado para su uso en hormigón proyectado, losa de pavimentos y aplicaciones prefabricadas.

- **Mezcla**

La fibra BarChip54 se añade con el plástico que las contiene a la betonera, estas se disuelven en la mezcla, con el agua contenida. Luego se integran materiales secos y mezcla a alta velocidad durante 5 minutos.

- **Bombeo**

Puede ser bombeado a través de mangueras generando capas de 50 mm de revestimiento sin riesgo a desprendimiento. Se deben tomar precauciones para que las fibras puedan pasar libremente a través de la rejilla de la tolva.

- **Manejo y Almacenamiento**

Se envasa en bolsas de papel de 3 kg y se suministra en pallets de 432 unidades. Las bolsas almacenadas individualmente deben ser protegidas del agua

- **Características del producto**

- Hecha a base de resina de olefina modificada
- Longitud 54 mm
- Resistencia a la tracción de 640 MPa
- La textura de la superficie es de relieves continuos
- El Numero de Fibras por kg es de 37000
- La gravedad específica es de 0,90 a 0,92
- Módulo de Young 10 GPa

Como beneficios de esta fibra se pueden mencionar, según fabricante:

- Tenacidad a la flexión igual al acero
- La durabilidad es a largo plazo - libre de corrosión
- Más seguro y más ligero que el acero para manejar
- Embalaje de pallets resistente a la intemperie
- Reducción del desgaste en las bombas y mangueras de hormigón

- **Dosificación**

BarChip54 tiene una tasa de dosis regular de 4 kg/m<sup>3</sup> a 6 kg/m<sup>3</sup>. No obstante, la dosificación debe ser determinada en base al rendimiento que se espera en el estudio, es esta oportunidad se trabajara y analizara con 4 kg/m<sup>3</sup> , 8 kg/m<sup>3</sup> y 12 kg/m<sup>3</sup>.



Imagen 2.3). Fibra sintética BarChip54.

## 2.3 Aplicaciones

El amplio uso que se le ha otorgado al HRF se ha visto acompañado en el desarrollo de los métodos de ensayo para el diseño estructural, cuyo comportamiento debe ser descrito de forma completa mediante el uso de parámetros no convencionales como la tenacidad, además de la resistencia a la compresión y a la tracción.

- **Pisos y pavimentos**

Las microfibras han encontrado su campo natural de uso y aplicación en estructuras donde la relación superficie/volumen es muy alta. De alguna forma si estamos interesados en un concreto seco existen pocas configuraciones que sean más eficientes para evaporar, diferentes a las de extender el material dándole un bajo espesor. Esto hace que pavimentos, pisos y morteros de nivelación sean estructuras muy susceptibles a fisurarse durante las primeras etapas de fraguado y endurecimiento.

Las microfibras a pesar de su baja dosis en masa ( $< 1\text{kg}/\text{m}^3$  de concreto) representan una verdadera dispersión de millones de fibras dentro de la matriz del concreto que absorben los micros esfuerzos generados por la retracción plástica e impiden que nazca o se propague la fisuración. Entre más delgada sea la aplicación menos costosa será la inclusión por metro cuadrado y más eficiente será su funcionamiento.

- **Shotcrete**

Al igual que en pisos y pavimentos en el shotcrete las macro- fibras sustituyen la malla electro soldada, que en este caso se constituye en parte de la ruta crítica de un ciclo de excavación. Los tiempos de ahorro que representan eliminar la colocación y fijación de la malla justifican ampliamente la diferencia en costo por metro cuadro del material colocado.

Sin embargo más allá del aumento en el rendimiento de excavación, el uso de las fibras como refuerzo permite un ahorro muy importante en la cantidad de concreto lanzado debido a que pueden seguirse estrictamente los espesores del concreto colocado. El interés de cualquier constructor de túneles es disminuir la excavación al máximo y sin duda el control de espesores es un capítulo de vital interés en la concepción y construcción de estas obras subterráneas.



Imagen 2.4). Aplicación HRF por medio de shotcrete en túneles de grandes mineras. (Concrete, SIKA 2010).

- **Hormigones resistentes a explosiones**

Todas las explosiones funcionan bajo un mismo principio, un material inestable líquido o sólido se expande dentro de un gas en un lapso de tiempo extremadamente corto (*milisegundos*), de modo que ocupa un volumen entre cientos a miles de veces mayor de su volumen original. Los gases empujados por la explosión impactan la atmosfera alrededor del punto de detonación creando un importante y muy rápido frente de presión, algunos llaman este frente, onda de choque.

Esta sorpresiva y extremadamente rápida carga impacta las estructuras y materiales con una magnitud que depende de la distancia y claro, del tamaño de la detonación. Un elemento de concreto al recibir este tipo de cargas (dinámicas y cíclicas) podría evitar colapsar apelando tanto a su capacidad de resistencia mecánica como a su capacidad de deformación. Ambas respuestas (generación de esfuerzos internos y generación de deformaciones) absorben la energía (*carga · distancia/tiempo*) de esta súbita carga hasta sus límites. Un concreto reforzado de la manera convencional cederá fácilmente el concreto de recubrimiento y aún más material dependiendo de la magnitud de la explosión. Esto se debe justamente a que la capacidad de deformación del concreto en general es muy limitada, un concreto reforzado con fibras le permite al material llegar a su punto peak de resistencia, fallar y seguir deformándose (fisurado) de modo que el elemento no colapsa, esto se identifica por medio de la tenacidad del elemento analizado.

- **Concretos de ultra-alta resistencia**

Los concretos de ultra-alta resistencia o concretos de polvo reactivos son aquellos cuya resistencia se encuentra entre  $1200 \text{ kg/cm}^2$  a  $1800 \text{ kg/cm}^2$ . Estos concretos de resistencias extremas al fallar lo hacen de una manera explosiva puesto que su capacidad de deformación es baja (son frágiles), si se considera que sus módulos elásticos están por encima de los  $500.000 \text{ kg/cm}^2$ .

El uso de fibras en los concretos de polvos reactivos elimina la falla súbita y le confiere al material una mayor ductilidad. Las fibras que se emplean en los concretos de ultra alta resistencia o BPR (Béton des Poudres Reactives) tienen en general una longitud entre  $4 \text{ mm}$  y  $15 \text{ mm}$  con un diámetro cercano a  $0.2 \text{ mm}$  de acero de alto carbono. La cantidad es muy superior a la empleada para aplicaciones normales considerando que por metro cúbico de concreto se utilizan cuantías cercanas a los  $160 \text{ kg/m}^3$ , es decir para un volumen aproximado del 2%. Para semejantes niveles de dosificación las fibras tienen un aporte importante tanto en la resistencia a la flexión, como a la compresión y corte.

## Capítulo 3. Investigación Propuesta

### 3.1 Ensayos

Según los estudios de tracción y flexión, para la caracterización del HRF en el estado post – fisuración idealmente se debería aplicar ensayos de tracción directa. Una de las alternativas establece una relación de tensión a tracción- apertura de fisura ( $\sigma - \omega$ ), por medio de una probeta cilíndrica con entalla perimetral, pero es sabido que este ensayo presenta problemas de preparación y sujeción de probeta y alta dispersión de resultados. La variabilidad de los parámetros de tenacidad se acerca al 30 %, esta dispersión se debe a que las fibras se distribuyen aleatoriamente en la matriz y consecuentemente en la pequeña sección fisurada, lo que indica que el ensayo no es representativo ni permite establecer un control sistemático del HRF (Saludes et al., 2007). Es por esto que el análisis propuesto se realiza mediante 3 tipos de ensayos.

Las características geométricas y parámetros de caracterización de los ensayos a estudiar se indican en la *tabla 3.1*

Ensayo	Dimensiones Probeta (mm x mm x mm)	Peso Probeta (kg)	Superficie de fractura (m <sup>2</sup> )	Parámetros para caracterizar HRF	C.V. (%)
ASTM C-1609	150x150x600	32,4	0,0255	Cargas Residuales Tenacidad Resistencia a la flexión	15
EN-14651	150x150x530	29,7	0,0188	Limite proporcionalidad Resistencias residuales Curva carga-apertura circunferencia	20-30
Doble punzonamiento	150xØ150	6,4	0,0338	Resistencia a la tracción Absorción de energía Tenacidad	13

Tabla 3.1). Características de los ensayos estudiados para altas cuantías de HRF.

### 3.2 Ensayo de viga Norma ASTM C-1609

La norma ASTM C 1609 (2007), especifica el ensayo de flexión con carga a los tercios, sobre probetas sin entalla, y la tenacidad es cuantificada a través de los índices de tenacidad y de resistencia a la primera fisura de los HRF.

- **Viga**
  - Ensayo con carga en los tercios
  - Dimensiones:  $150 \times 150 \times 530 \text{ mm}$
  - Luz de apoyos:  $450 \text{ mm}$
  - Deformación máxima:  $\frac{L}{150} = 3 \text{ mm}$

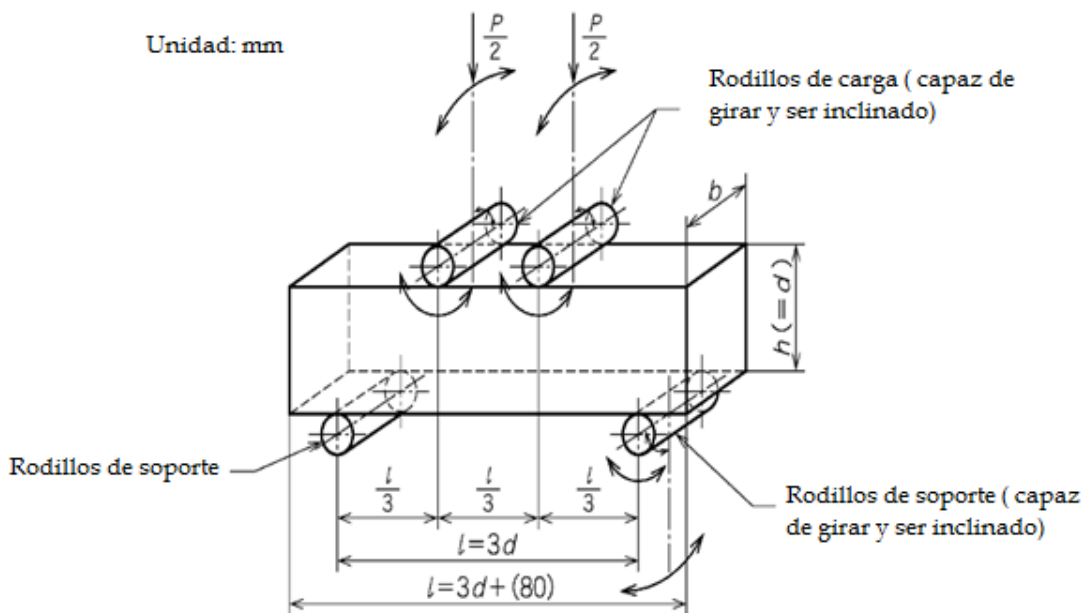


Imagen 3.1). Representación de ensayo ASTM C-1609. (Concrete, SIKA 2010).

Un dibujo representativo del fisuramiento real, nunca se produce a la mitad exacta siempre varía algunos milímetros, es por esto que también parte de la experimentación es generar un factor para el distanciamiento de la rotura, esto permitirá obtener valores más exactos.

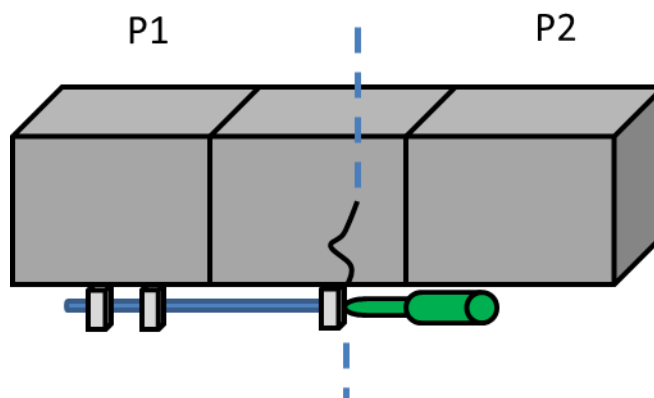


Imagen 3.2). Vista elevación 3D, lados correspondientes a las fibras obtenidas luego del completo fisuramiento de la viga.

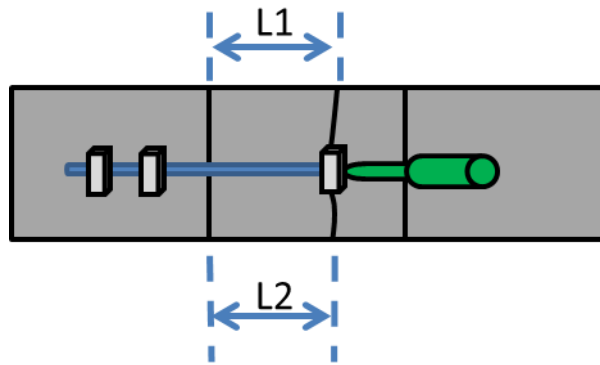


Imagen 3.3). Vista Invertida planta, distancias correspondientes a la rotura de la viga para obtener  $a$  y delta flecha.

Una descripción de los resultados de todos los ensayos ASTM C 1609 realizados en laboratorio se encuentra en la *tabla 1, en capítulo 7 (Anexos)*.

El ensayo ASTM C1609, también denominado método de prueba estándar para el rendimiento a la flexión del concreto reforzado con fibra (utilizando una viga con el tercer punto de carga), es una especificación que regula la prueba de la fibra vigas de hormigón armado.



Imagen 3.4). Representación en laboratorio del ensayo ASTM C-1609.

Con la máquina MMC8 de ensayo de compresión, controlada a través de un transductor, se realiza una prueba a tasas netas de desviación especificadas, según lo determinado en el punto de fisura de la viga a aproximadamente la mitad del tramo. La máquina de ensayo debe ser capaz de controlar a velocidades muy lentas.

El dispositivo de carga se ubica al tercio de la viga con dos puntos de apoyo y dos narices de carga en la parte superior de la viga. Una plantilla rectangular rodea el haz y está montado en el eje neutro de la viga directamente sobre los soportes. Un transductor de desplazamiento, al lado de la viga, se monta a la mitad de luz para medir la desviación del rayo. La salida del transductor otorga la medición neta deflexión. Esta configuración asegura una medición precisa de la mitad del tramo de desviación y reduce al mínimo los errores debidos a la torsión probeta de hormigón o de asiento en los soportes. Donde se busca obtener el siguiente grafico característico.

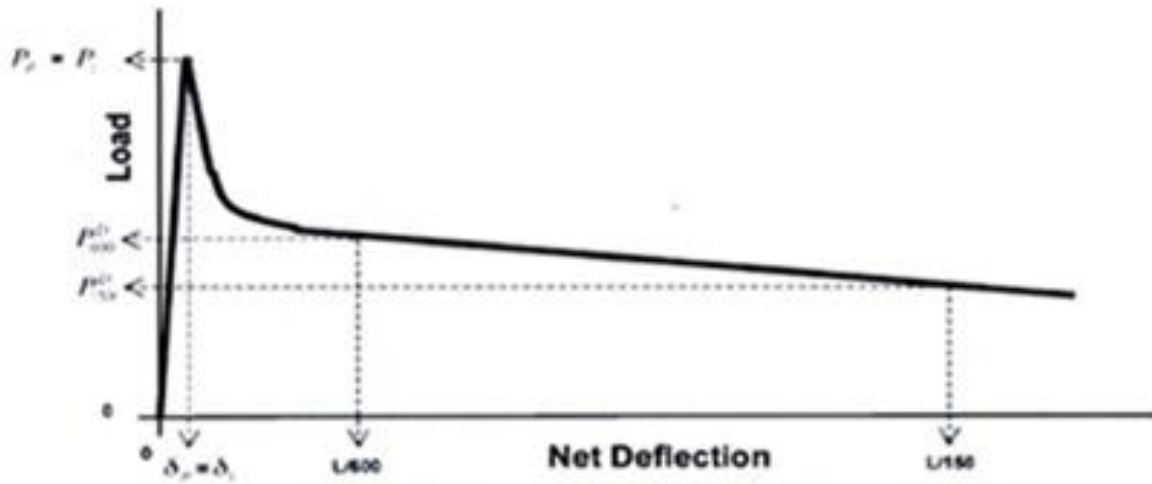


Imagen 3.5). Grafico representativo carga vs deflexión neta. (Chioma, 2009).

La resistencia residual en flexión bajo norma ASTM C-1609 a una deflexión de  $L/300$  debe ser mayor o igual al 90% de la resistencia máxima en flexión del hormigón, y para una deflexión de  $L/150$  debe ser mayor o igual al 75% de la resistencia máxima en flexión del hormigón.

### 3.3 Ensayo de viga Norma EN 14651

El ensayo EN 14651 (CEN, 2005), posee la ventaja de que es simple y se controla a través del desplazamiento de apertura de los bordes de la fisura (CMOD por el inglés Crack Mouth Opening Displacement), que asegura una propagación estable de la fisura, incluso para hormigón en masa. La curva carga – CMOD o bien la carga – deflexión obtenidas a través de él pueden ser usadas para calcular las relaciones tensión – deformación o tensión - ancho de fisura y, de este modo, evaluar el efecto de la incorporación de las fibras.

Método de ensayo para hormigón con fibras, de la cual se mide la resistencia a la flexotracción (límite de proporcionalidad (LOP), residual).

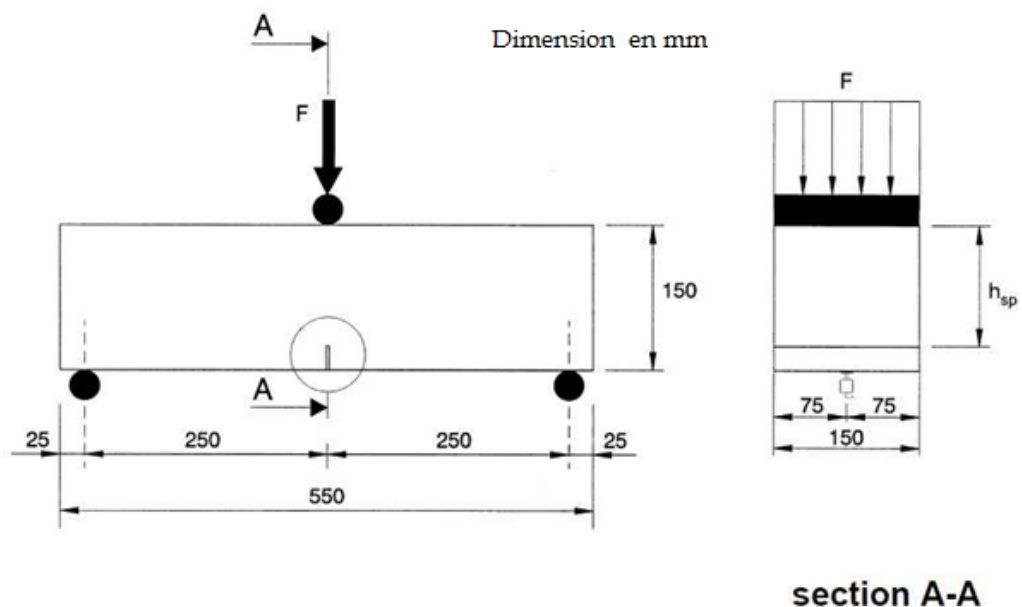


Imagen 3.6). Representación ensayo EN 14651.(Chioma, 2009).



Imagen 3.7). Representación en laboratorio en dos vistas de ensayo EN 14651.

Una tabla con los resultados de todos los ensayos EN 14651 realizados en laboratorio se encuentra en la *tabla 2, en el capítulo 7 (Anexos)*.

A través de la siguiente ecuación, la cual se desarrollara en cálculos, se pretende obtener los valores del siguiente grafico o resistencia residual maxima. La resistencia a la tracción a la flexión residual  $f_{R,j}$  ( $j = 1,2,3,4$ ) por la expresión:

$$f_{R,j} = \frac{6M_j}{bh_s^2} = \frac{3F_j l}{2bh_s^2} \quad (1)$$

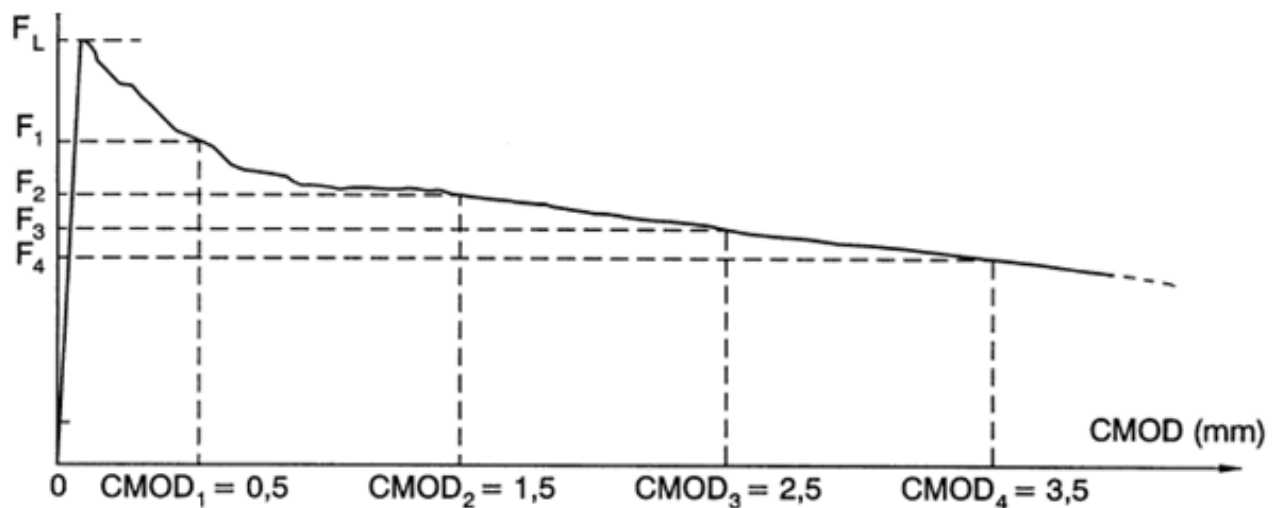


Imagen 3.8). Grafico representativo carga vs deflexión neta. (Chioma, 2009).

La dosis de fibra utilizada debe cumplir con una resistencia residual igual o mayor a  $1,5 \text{ Mpa}$  a un  $CMOD$  de  $0,5 \text{ mm}$  (equivalente a una deflexión central de  $0,47 \text{ mm}$ ) y una resistencia residual igual o mayor a  $1,0 \text{ Mpa}$  a un  $CMOD$  de  $3,5 \text{ mm}$  (equivalente a una deflexión central de  $3,02 \text{ mm}$ ). De manera secuencial de 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 debiese alcanzar el 95%, 90%, 80% y 75% de la resistencia especificada del hormigón.

### 3.4 Ensayo de Doble Punzonamiento Norma UNE 83515 (BCN)

Ensayo Barcelona (BCN) propuesto por Molins et al., (2009) y adaptado a norma española por AENOR como UNE 83 -515 (AENOR, 2010), es un ensayo de tracción indirecta que permite el cálculo de la tenacidad y resistencia residual a través de una relación carga ( $P$ ) – Total Circunferencial Opening Displacement (TCOD) de la probeta y consiste en someter a una carga de compresión una probeta cilíndrica de HRF de diámetro ( $2b$ ) igual a su altura ( $2h$ ), por medio de dos placas de acero centradas en la cara superior e inferior tal como se indica en la figura 2-6. La relación entre el diámetro de las cuñas de carga y la probeta es  $2a/2b= 0,25$  (Molins et al., 2009). La carga  $P$  debe ser registrada de forma continua y el TCOD medido a la mitad de la altura de la probeta.

La norma española UNE 83 – 515 define las condiciones generales de aplicación del ensayo en la cual se indica:

- Diámetro de la probeta ( $d$ ): 150 mm.
- Altura de la probeta ( $h$ ): 150 mm.
- Velocidad de desplazamiento del actuador: 0,5 mm/min.
- Control del ensayo a través de la deformación circunferencial del cilindro (*TCOD*).

Sin embargo esta última condición en la cual se necesita utilizar un extensómetro circunferencial, equipo poco frecuente en laboratorios de control y de alto costo, hace que su uso sea poco masivo.

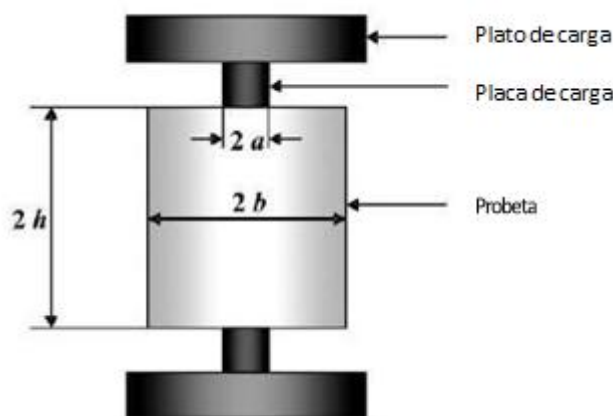


Imagen 3.9) Configuración del ensayo de doble punzonamiento y definición de parámetros geométricos. (Carmona, 2009).

En el ensayo la carga aplicada sobre el cilindro a través de las cuñas de acero, produce una zona cónica de compresiones bajo estas, generando un incremento del diámetro de la probeta, produciéndose esfuerzos de tracción perpendiculares a los planos radiales de la probeta. Cuando la tensión supera la resistencia a la tracción del hormigón se produce la rotura originándose grietas radiales perpendiculares al campo de tensión generado. Las grietas se propagan desde el centro de la probeta; desde el borde formado por la cuña de acero hacia el perímetro del cilindro.

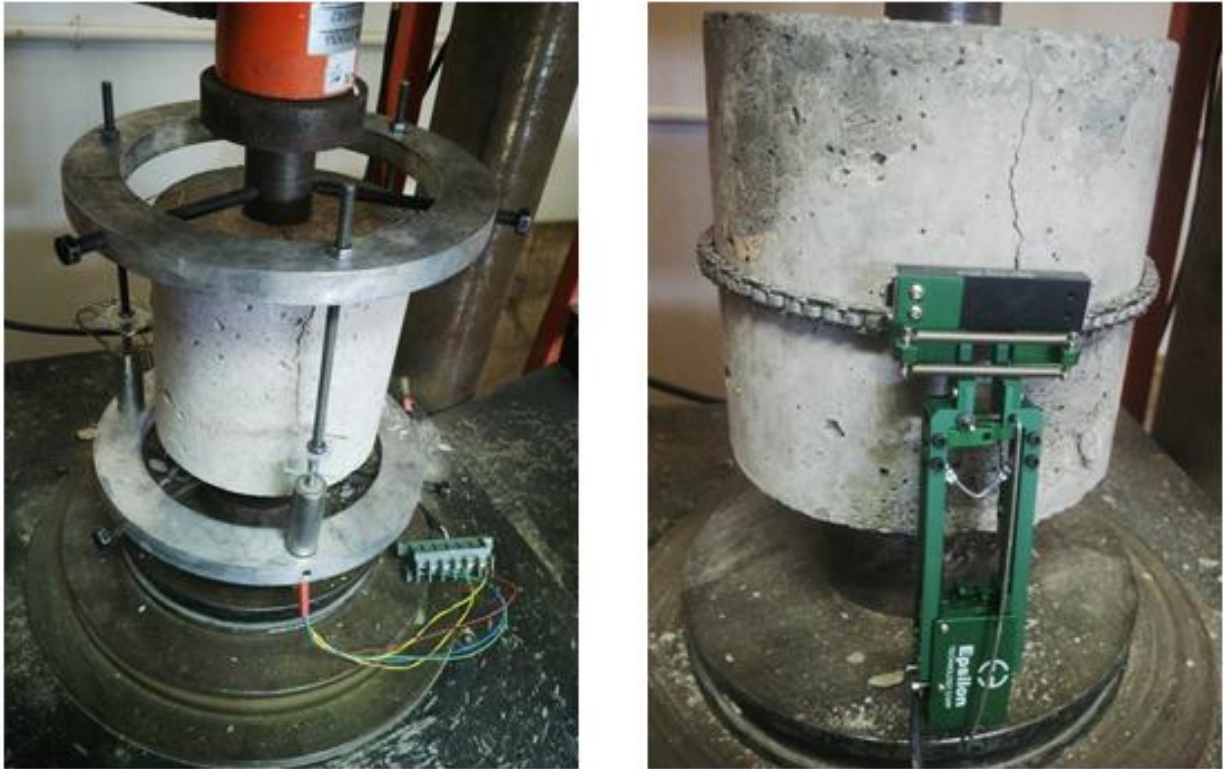


Imagen 3.10) Ensayo BCN Punzonamiento y BCN por medio de cadena extensometro.

El cono que se forma y su desplazamiento al interior del cilindro producen un aumento del radio de éste, causando la aparición de dos, tres y hasta cuatro grietas tal como se muestra en la *imagen 4.5.2*.

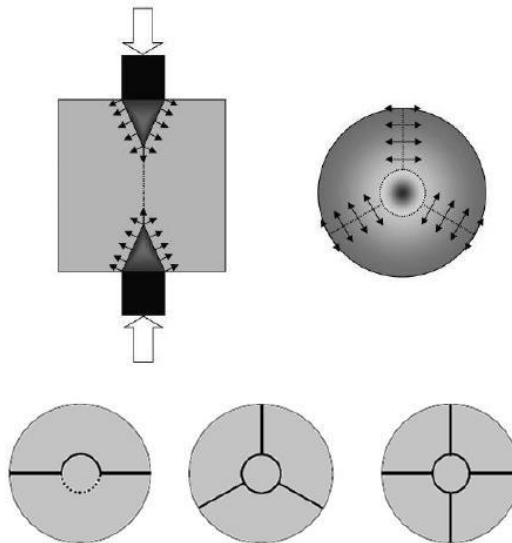


Imagen 3.11) Cuñas de compresión y tracción; Planos de fisuración tipo de ensayo de doble punzonamiento. (Carmona, 2009).

La apertura circunferencial generada en cada una de las fisuras es medida y corresponde al desplazamiento total de las fisuras (TCOD) y la energía disipada de los HRF en el proceso de carga se calcula como:

$$E(TCOD) = T_{0P}^{COD} \cdot TCOD \cdot d(TCOD) \quad (2)$$

Donde P corresponde a la carga aplicada durante el ensayo y E(TCOD) la energía medida a un determinado valor de TCOD, la que está directamente relacionada con la tenacidad determinada mediante el ensayo flexo tracción de la norma belga NBN B 15 – 238 (Molins, et al., 2009).

Para el cálculo de la resistencia a la tracción del hormigón ( $f_t$ ) en el ensayo de doble punzonamiento, se han propuesto diferentes ecuaciones en base a estudios realizados por Chen, 1970; Chen y Yuan, 1980; Bortolotti, 1988 y Marti, 1989, las que en general dependen de las dimensiones de la probeta y del ángulo de la cuña de compresiones que se forma al interior del cilindro. Basándose en un modelo elástico para la distribución de tensiones circunferenciales y verticales en el ensayo de doble punzonamiento, desarrollado por Saludes et al., (2007), usando un modelo de bielas y tirantes, propusieron la relación:

$$f_t = \frac{P}{9\pi a \cdot h} \quad (3).$$

Esta expresión tiene la ventaja de ser la única que acepta la fractura de la probeta y que permite su utilización para el cálculo de la resistencia última en cuerpos fisurados. Además no depende del número de fibras que se formen en el cuerpo y se puede usar para el análisis en el rango post fisuración de los HRF (Mora, 2008).

A la ventaja anteriormente nombrada se suma el tamaño de las probetas cilíndricas que se pueden moldear  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , cortadas a partir de cilindros normalizados de  $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  o bien extraer testigos de hormigón endurecido, y además de la posibilidad de usar prensas convencionales de ensayo, disponibles en todos los laboratorios de control de calidad de materiales (Carmona et al., 2011). En nuestro caso se usan semicilindros confeccionados con tubos de PVC en laboratorio.



Imagen 3.12) Semicilindros confeccionados con tubos de PVC de  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  en laboratorio, para probetas BCN.

## Capítulo 4. Desarrollo Experimental

### 4.1 Granulometría

El tamaño máximo de agregado es  $5\text{cm} - 10\text{cm}$ , si se utilizan áridos con mayor tamaño máximo se producirán hormigones que tienden a la segregación, mientras para hormigones de altas resistencias se recomiendan tamaños máximos de menores dimensiones.

Para conseguir la arena apta al producto que se desea obtener, se debe cumplir con los debidos análisis, tamizado y correcciones presentados a continuación.

- Granulometría:

MUESTRA: 491 GR				
Tamiz	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
Nº 4	55	11,20	11,20	88,80
Nº 8	144	29,33	40,53	59,47
Nº 16	84	17,11	57,64	42,36
Nº 30	58	11,81	69,45	30,55
Nº 50	88	17,92	87,37	12,63
Nº	41	8,35	95,72	4,28
< 100	21	4,28	100,00	0,00

Tabla 2.1). Granulometría de la arena.

Tamaño Máximo Absoluto ( $D_a$ ) =  $10\text{ mm}$  Tamaño Máximo Nominal ( $D_n$ ) =  $5\text{ mm}$ .

- Arena del Proyecto:
  - Densidad aparente suelta =  $1.695,05\text{ kg/m}^3$
  - Densidad compactada por percusión =  $1.908,98\text{ kg/m}^3$
  - Densidad real árido saturado superficialmente seco =  $2518,8$
  - Densidad real árido seco =  $2.521,5$
  - Densidad Neta =  $2.683,2$
  - Absorción de agua =  $2,39\%$
- Corrección de la Dosificación:

A continuación se procede a realizar la corrección de la dosificación inicial, a partir de los estudios realizados a la arena y grava.

	GRAVA	ARENA
% Que Pasa Acumulado por # 4	6,70	97,60
% Humedad	0,10	0,30
% Absorción	1,10	1,35

Tabla 2.2). Datos obtenidos en laboratorio para realizar corrección de dosificación inicial.

Además, para mayor exactitud, se corrige la humedad en los contenedores de 1000 *lts* donde se almacenaba la arena.

<b>CONTENEDOR 1</b>	HUMEDA	1968 GR	1659 GR	%H=3,56%
	SECA	1909 GR	1600 GR	
<b>CONTENEDOR 2</b>	HUMEDA	1700 GR	1402 GR	%H=4,28%
	SECA	1640 GR	1342 GR	

Tabla 2.3). Corrección humedad contenedores.

Se determina según especificaciones de proveedor, que la cantidad de aditivo utilizar va desde los 110 a 400  $cm^3$  de aditivo por cada 100 *kg* de Cemento.

Esta recomendación no considera hormigones con fibras, por lo tanto se utilizan 3,5 *litros por m<sup>3</sup>* de hormigón, dato obtenido por experiencias anteriores de laboratorio.

## 4.2 Confección del Hormigón

La confección de los hormigones se realizó en el patio del laboratorio de hormigón LEMCO para lo cual se utilizó una Mezcladora de eje vertical marca Matest® de capacidad 100 *lt*. En cada amasada se vertió a la mezcladora, primeramente, los áridos y el cemento agregando posteriormente el agua; una vez alcanzada una homogeneidad se incorporó a la mezcla la cantidad de fibra correspondiente y finalmente se agregó el aditivo superplastificante. Para cada sesión se confeccionaron 3 amasadas de 90 litros cada una aproximadamente, donde se moldearon 15 vigas (150 × 150 × 530) *mm* basado en la norma ASTM 1609, 15 vigas (150 × 150 × 600) *mm* basado en la norma EN 14651 y 10 cilindros Barcelona (150 × 150) *mm* cuyos parámetros geométricos están basados en la norma UNE 83-515, esto se realiza para cada dosificación de fibra. Las probetas se taparon con polietileno, siendo desmoldadas a los 3 días. En total se realizaron 9 sesiones.

La experiencia en el laboratorio permitió generar unos moldes de fácil manipulación para el ensayo BCN. Los cuales son de base de melamina y tubos PVC de 150 *mm* × 150 *mm*, adherido con silicona caliente y luego fría, esto permite un fácil desarme y desmolde para el posterior ensayo.



Imagen 4.2). Distribución en terreno de vigas (150 × 150 × 530) *mm*, vigas (150 × 150 × 600) *mm* cilindros Compresión (150 × 300) *mm* y cilindros Barcelona (150 × 150) *mm*..

Es de suma importancia mantener un organigrama de cada amasada con los moldes programados, el número de la amasada, la relación real v/s programado, la cantidad de aditivo vertido, el agua sobrante o excedente, el cono de Abrams y sobre todo la fecha en que se realiza para poder calcular debidamente los días de curado hasta su ensayo, es este caso se ensayaban a los 28 días al alcanzar un 70% de la resistencia especificada.



Imagen 4.3). Confección del hormigón en Mezcladora de eje vertical marca Matest® de capacidad 100 lt.

Para el hormigón usado en este estudio se utilizó cemento chileno *Polpaico 400 Especial* de la Planta localizada en Reñaca. Los agregados fueron arena negra tamaño máximo 0 – 5 mm y grava chancada de 5 – 10 mm proveniente del Río Maipo (proveedor ubicado en Placilla, V Región) y la relación agua/cemento fue  $a/c = 0,466$ . Con el fin de aumentar la trabajabilidad del hormigón se incorporó un aditivo superplastificante reductor de agua de alto rango *SIKA® Viscocrete®5100 CL* cuya recomendación de dosis es de 1% del peso del cemento y/o una dosis que varíe entre 0,3 a 1,5 % por cada 100 kg de cemento.

El desarrollo de este trabajo incluye el uso de fibra sintética *BarChip 54*; incorporadas en una proporción de  $12 \text{ kg/m}^3$  y a modo de comparación de  $4 \text{ kg/m}^3$  y  $8 \text{ kg/m}^3$ .

De esta manera se fabricó un total de 3 hormigones distintos siendo la única variable el tipo y cantidad de fibra, las cuales siguen una misma dosificación de los agregados y solo varía la fibra. Según la dosificación y su relación agua cemento se aproxima a un HN 35, pero debido a la incorporación de la fibra, debiese variar su resistencia.

COMPONENTE	4 kg/m <sup>3</sup>	8 kg/m <sup>3</sup>	12 kg/m <sup>3</sup>
ARENA 0/5	1550	1550	1550
GRAVA 5/10	150	150	150
AGUA	210	210	210
CEMENTO	450	450	450
ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	4,5	4,5	4,5
FIBRA BARCHIP 54	4	8	12

Tabla 4.1). Dosificación de HRF a utilizar en las distintas cuantías de fibras.

### 4.3 Nomenclatura

Para el ordenamiento de las vigas se propuso una nomenclatura, lo que permite la identificación de cada probeta:

Tenemos para las vigas ASTM C 1609:

$$\mathbf{FA - 1 - 4(X) - Y, \quad FA - 2 - 8(X) - Y, \quad FA - 3 - 12(X) - Y}$$

Para las vigas EN 14651:

$$\mathbf{FE - 1 - 4(2) - 1, \quad FE - 2 - 8(X) - Y, \quad FE - 3 - 12(X) - Y}$$

Para los cilindros (BCN) UNE 83515:

$$\mathbf{FB - 3 - 12(X) - Y, \quad FB - 3 - 12(X) - Y, \quad FB - 3 - 12(X) - Y}$$

Donde,

- **F = Fondecyt (proyecto para el cual se trabaja)**
- **A = viga ASTM C 1609**
- **E = viga EN 14651**
- **B = medio cilindro (BCN) UNE 83515**
- **1 - 4 = dosificación 1 con  $4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  de fibra**
- **2 - 8 = dosificación 2 con  $8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  de fibra**
- **3 - 12 = dosificación 3 con  $12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  de fibra**
- **Dos 1 = Dos 2 = Dos 3 = misma dosificación solo cambia la cantidad de fibras.**
- **(X) = número de la amasada según programación (del 1 al 9)**
- **-Y = número de probeta respecto a una amasada (del 1 al 6)**

Con esta aclaración a la nomenclatura se pueden interpretar tablas de valores obtenidos al someter las vigas a carga. Además para motivos de análisis se cuenta la cantidad de fibras a la vista luego de fracturarse por completo la viga y tener una densificación por área de la cara fisurada de la probeta. Todas estas tablas detalles se presentan en el *capítulo 7, Anexos*.

## Capítulo 5. Cálculos y Análisis

### 5.1 Cálculo de Viga Norma EN 14651

En este ensayo de flexión, la carga y entalla se generan en el centro de la viga, controlado por medio de un transductor, el cual rastrea en forma continua la carga a una razón de 5Hz. Estas características permiten ir registrando la apertura de fisura (CMOD) y la flecha (LVDT) en función de la carga aplicada como se puede apreciar en la *imagen 5.1*.

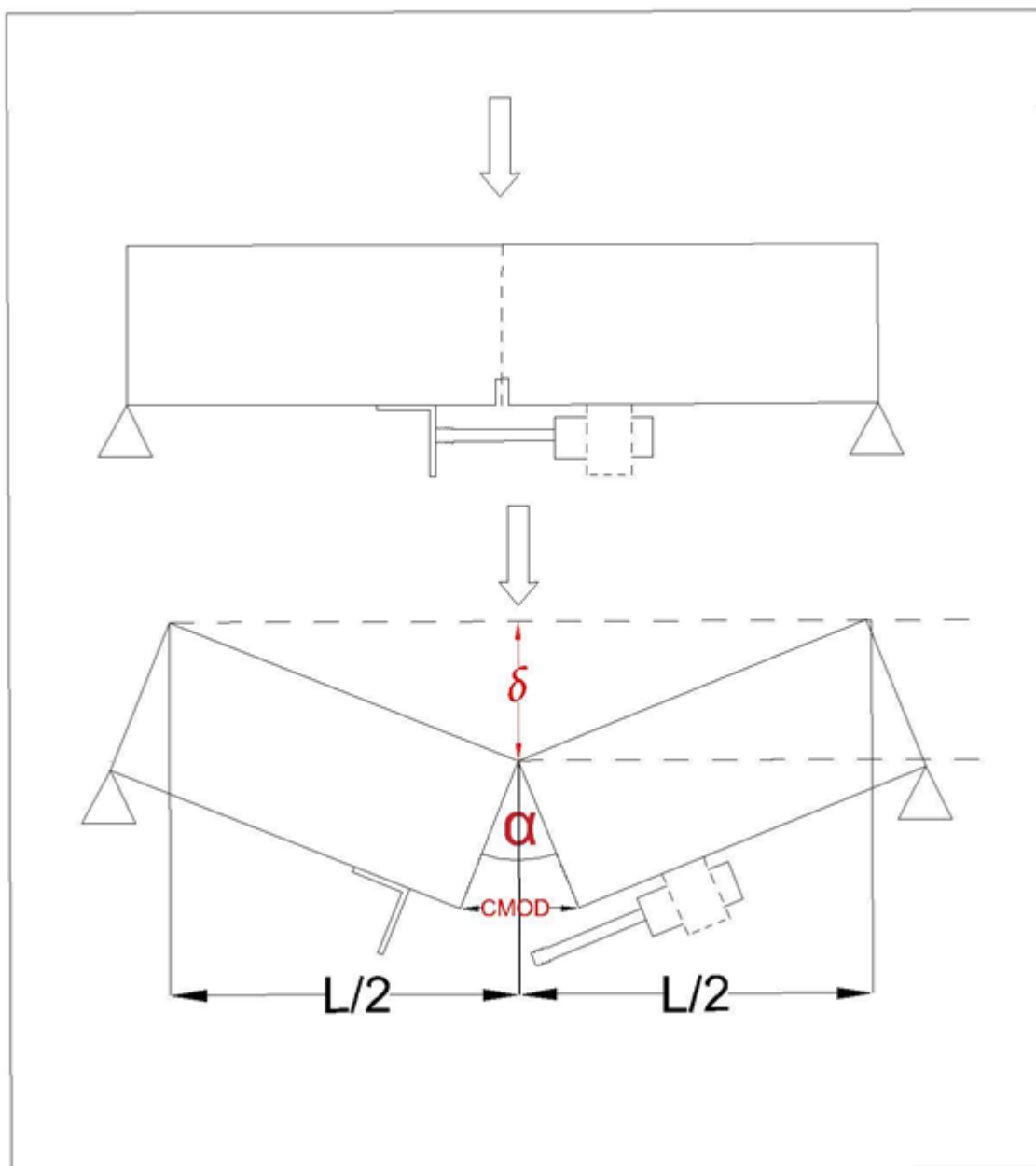


Imagen 5.1) Dibujo de rotura en el centro, seguido de la apertura aproximadamente en el medio con sus variables.

La rotura de la viga tiene cierto delta de distanciamiento al eje de este mismo, se realiza una corrección de los datos obtenidos para asociarle un CMOD característico y en unidades visibles mm, a la vez se calcula el esfuerzo y la tenacidad, valores que serán útiles para la generación de gráficos representativos.

Este ensayo permite analizar la carga en función de la apertura de fisura. Donde se busca a través de la flecha obtener un CMOD característico. Mediante más de 5000 datos obtenidos por el software, el valor  $\delta_c$  se relaciona con la apertura de fisura CMOD, por medio de las siguientes ecuaciones.

- $CMOD_C = CMOD \cdot \frac{150}{171}$
- $\delta = \frac{-1 \cdot (af+p)}{1000}$
- $\delta_C = \frac{(225+(75-a))}{225 \cdot \delta}$
- $\alpha = \alpha = \frac{\delta_C}{225}$
- $CMOD_{c1} = CMOD_C \cdot \cos(\alpha)$
- $CMOD_{c2} = CMOD_{c1} \cdot 150/171$
- $Esfuerzo = \frac{3 \cdot Carga \cdot 500000}{(2 \cdot 150 \cdot 125^2)}$
- $Tenacidad = \frac{(Carga_{anterior} + Carga)}{2} \cdot (CMOD_{C anterior} - CMOD_C) + Tenacidad_{anterior}$

Realizando la intersección entre las últimas dos columnas  $CMOD_{c2}$  y  $Carga$  se obtienen un gráfico representativo con las correcciones realizadas a la apertura, lo que permite entregar un valor más preciso, no obstante se aprecia que para este ensayo la diferencias entre  $\delta$  y  $\delta_C$ , es mínimo.

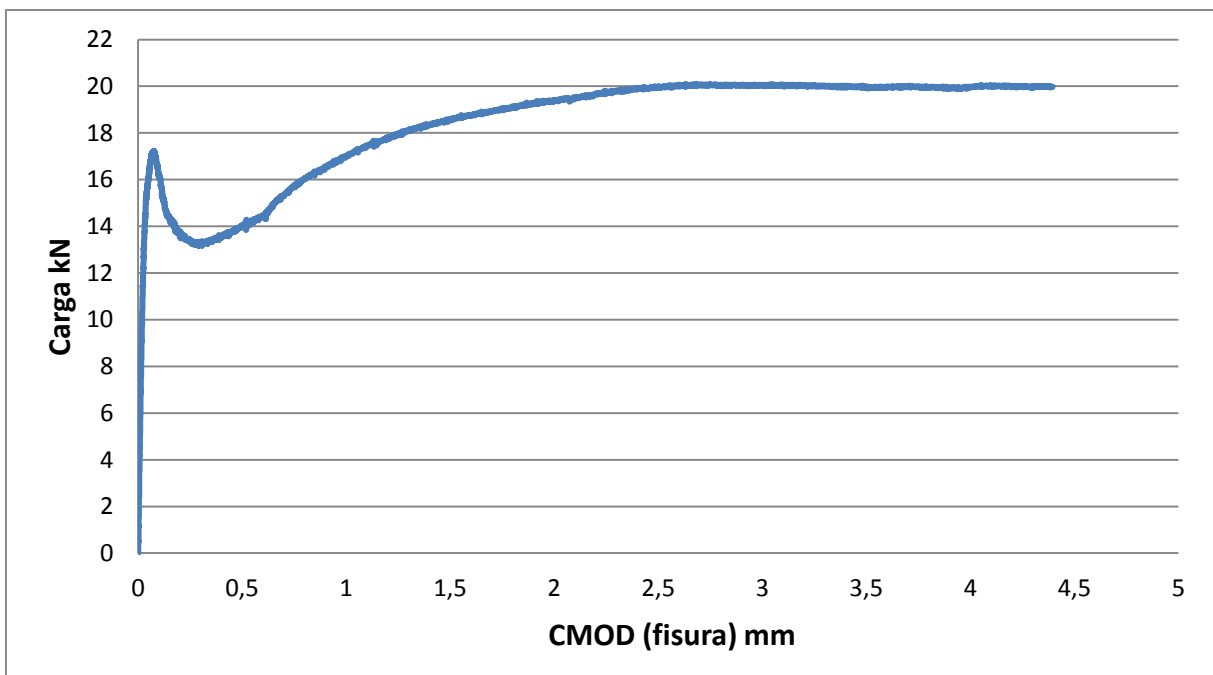


Gráfico 5.1) Carga kN v/s CMOD corregido mm

En este gráfico representativo del promedio de los ensayos se obtiene una carga máxima de 18 kN aproximadamente. Pero se observa que luego de la rotura, aumenta su resistencia residual a 20 kN demostrando un comportamiento dúctil.

## 5.2 Cálculo de viga Norma ASTM C-1609

Al ser sometido a carga a los tercios de la viga, el transductor registra un desplazamiento de la flecha ( $\delta$ ), el cual, a diferencia del ensayo de flexión con carga y entalla central dado por EN-14651, en el este ensayo de flexión la fisura, generalmente, se genera fuera del tercio central, lo que produce una distorsión en la medición de la flecha, el que se representa por  $\delta_c$ , como se muestra en la *imagen 5.2*.

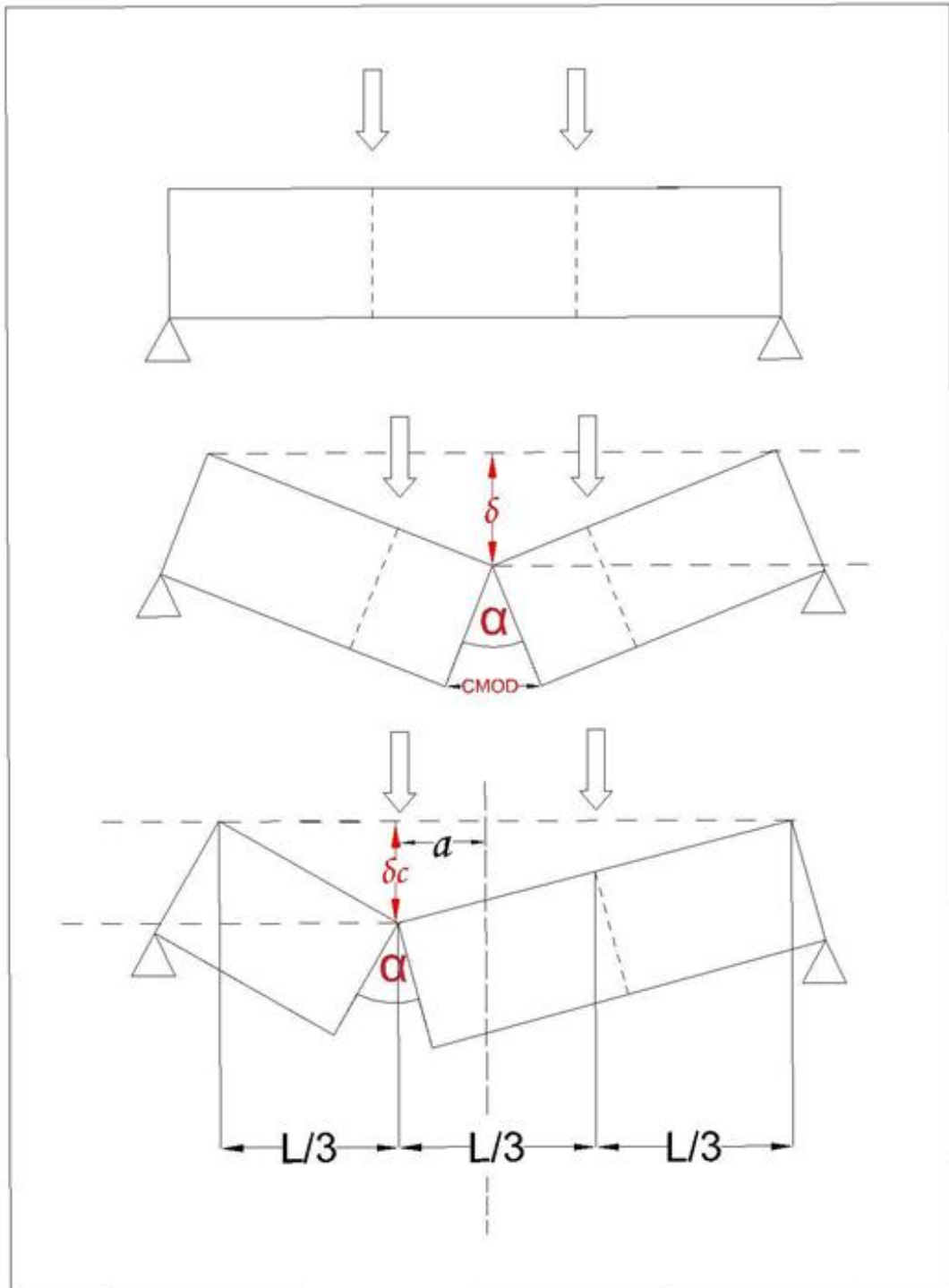


Imagen 5.2) Dibujo de rotura en el centro, seguido de la apertura aproximadamente en el medio con sus variables.

Debido a que la rotura de la viga, por lo general, tiene cierto delta de distanciamiento al eje de esta misma, se realiza una corrección de los datos obtenidos para asociarle un *CMOD* característico y en unidades visibles mm, a la vez se calcula el esfuerzo y la tenacidad, valores que serán útiles para posteriores análisis.

Por medio de las siguientes variables se obtiene un  $\delta_c$  (delta corregido), el cual se desarrolla de la siguiente manera:

$$\frac{\delta}{\frac{l}{2}} = \frac{\delta_c}{\frac{l}{2} + a}$$

$$\delta_c = \frac{\delta}{\frac{l}{2}} \left( \frac{l}{2} + a \right) \rightarrow \frac{\delta}{l} (l + 2a)$$

En base a las tablas obtenidas se obtiene el valor de la flecha  $\delta$ , el paso a seguir es encontrar el valor de  $\delta + \Delta\delta = \delta_c$  (Delta Flecha), para esto se usan los valores ya obtenidos, pero usando el CMOD como  $\delta$ , por medio de correcciones referentes a la distancia respecto al eje de la viga ( $a$ ).

$$\text{Delta total} = \delta_c = (75 + a) \cdot \frac{\delta}{75}$$

Bajo este procedimiento ya se obtuvo el valor de la flecha CMOD, el paso a seguir es encontrar el valor del ángulo  $\alpha$ , descrito en la *imagen 5.3.1*, del cual se obtendrá un valor más limpio y exacto del CMOD obtenido, por medio de las correcciones que se presentaran a continuación:

- $p = \text{pendiente} = \left( -\frac{\text{intersección eje } x}{\text{intersección eje } y} \right)$
- $a = \text{Promedio}(L1 + L2) = \text{Ver Tabla2).$
- $\text{Apertura de Fisura } (af) = \text{Dada por el transductor de canal N}^\circ 5$
- $\text{Carga} = \text{Dada por el software canal N}^\circ 2$
- $\text{CMOD}_c = \text{CMOD} \cdot \frac{150}{171}$
- $\delta = \frac{-1 \cdot (af + p)}{1000}$
- $\delta_c = \frac{(225 + (75 - a))}{225 \cdot \delta}$
- $\alpha = \text{alpha} = \frac{\delta_c}{225}$
- $\text{CMOD}_{c1} = \text{CMOD}_c \cdot \cos(\alpha)$
- $\text{CMOD}_{c2} = \text{CMOD}_{c1} \cdot 150/171$
- $\text{Esfuerzo} = \frac{3 \cdot \text{Carga} \cdot 500000}{(2 \cdot 150 \cdot 125^2)}$
- $\text{Tenacidad} = \frac{(\text{Carga}_{\text{anterior}} + \text{Carga})}{2} \cdot (\text{CMOD}_{c \text{ anterior}} - \text{CMOD}_c) + \text{Tenacidad}_{\text{anterior}}$

Cálculos del cual se desprende el siguiente gráfico:

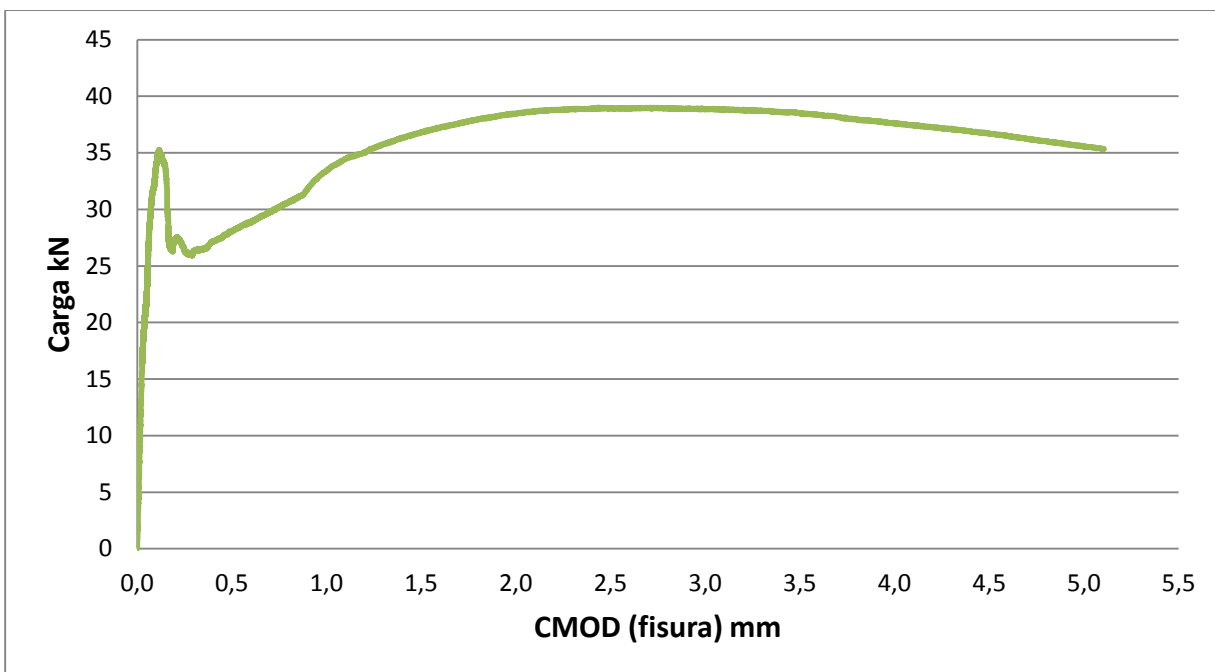


Grafico 5.3) Carga kN v/s CMOD corregido fisura mm.

En este grafico representativo de todos los ensayos se obtiene una carga máxima de 35 kN aproximadamente. Pero se observa que luego de la rotura, aumenta su resistencia alcanzo por ductilidad una resistencia de 40kN.

### 5.3 Correlación de ensayos ASTM C-1609 y EN 14651

Luego de realizar los cálculos de los valores de CMOD (fisura) para los ensayos bajo la norma EN y ASTM, se procede a hacer un resumen de 5 de las vigas más representativas de las 15 ensayadas. Se obtiene un promedio y los siguientes valores de tenacidad (t) y esfuerzo (f).

Estos valores de las vigas ensayadas por norma EN de  $12 \text{ kg/m}^3$  se ven reflejados en las siguientes tablas.

Fisura EN	FE-1		FE-2		FE-3		FE-4		FE-5		Promedio	
	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)
0,5	8,20	4,27	7,31	3,64	7,56	3,65	8,13	4,18	7,37	3,88	7,72	3,93
1,5	28,13	5,67	24,59	4,89	25,55	5,03	27,08	5,50	24,36	5,14	25,94	5,24
2,5	51,15	6,09	45,40	5,46	47,41	5,68	49,58	6,06	44,65	5,66	47,64	5,79
3,5	75,02	6,10	67,50	5,51	70,61	5,78	73,40	6,30	66,01	5,73	70,51	5,88

Tabla 5.1) Promedio de 5 valores representativos de tenacidad y esfuerzo para vigas de  $12 \text{ kg/m}^3$  de ensayo EN.

Paralelamente se realizaron ensayos de  $4 \text{ kg/m}^3$  y  $8 \text{ kg/m}^3$ , las cuales serán presentadas en otras memorias. No obstante, se realizan las correcciones generales para obtener valores de tenacidad y esfuerzo y así poder comparar y diferir entre las diferentes cuantías de fibra sintética para una misma dosificación.

Fisura EN	FE-4kg		FE-8kg	
	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)
0,5	4,15	1,26	5,78	2,53
1,5	8,55	1,16	15,87	3,08
2,5	12,88	1,20	27,60	3,38
3,5	17,17	1,17	40,13	3,57

Tabla 5.2) Promedio de valores más representativos de tenacidad y esfuerzo para vigas de 4 kg/m<sup>3</sup> y 8 kg/m<sup>3</sup> de ensayo EN.

La resistencia residual de la fibra de menor cuantía es la única que es la única que presenta el comportamiento esperado de que al aumentar la fisura la resistencia disminuye, no obstante para las vigas de mayor cuantía de fibras se observa un aumento de la resistencia residual, esto demuestra que en el rango de 0,5 mm a 3,5 mm de fisura las fibras trabajan contraponiéndose al quiebre y aumentando su ductilidad.

Al igual que los valores obtenidos de las vigas ensayadas por norma ASTM de 12kg/m<sup>3</sup>, se ven reflejados en las siguientes tablas.

Fisura ASTM	FA-1-2		FA-3-4		FA-5		Promedio	
	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)
0,75	15,68	9,98	8,08	6,78	16,18	9,31	15,42	10,14
3	80,51	12,07	36,71	8,75	76,55	10,89	74,64	12,21

Tabla 5.3). Promedio de 5 valores representativos de tenacidad y esfuerzo para vigas de 12 kg/m<sup>3</sup> de ensayo ASTM.

En el caso de los ensayos ASTM también se trabaja con vigas de 4 kg/m<sup>3</sup> y 8 kg/m<sup>3</sup> de cuantía, las cuales serán presentadas en otras memorias. No obstante, se realizan las correcciones generales para obtener valores de tenacidad y esfuerzo y así poder comparar y diferir entre las diferentes cuantías de fibra sintética para una misma dosificación.

Fisura EN	FE-4kg		FE-8kg	
	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)
0,75	7,55	3,00	8,30	5,57
3	22,35	4,03	35,28	6,91

Tabla 5.4) Promedio de valores de tenacidad y esfuerzo para vigas de 4 kg/m<sup>3</sup> y 8 kg/m<sup>3</sup> de ensayo ASTM.

Con la determinación de estos valores se concluye que los datos obtenidos del ensayo de ASTM se pueden comparar al generar una correlación de valores de *CMOD* característicos para ambos ensayos, los cuales se reflejan en la *tabla 5.5*, con resultados que arrojan un coeficiente de variación no mayor al 17%. Esto significa que la asimilación respecto a los resultados esperados es relativamente precisa.

deflexión mm	CMOD corregido mm					Promedio %	CV
	1	2	3	4	5		
0,75	0,87	0,69	0,67	0,77	0,86	0,77	12%
3	3,94	2,67	2,78	3,72	3,57	3,34	17%

Tabla 5.5) Aperturas de fisura (CMOD) correspondientes a deflexiones de 0,75 y 3,0 mm del ensayo de viga ASTM.

Otra forma de visualizar la relación entre los valores de CMOD obtenidos de ambos ensayos es comparando los gráficos, cual se ve que el ensayo de ASTM alcanzo mayor resistencia a la primera fisura, pero ambos mantienen una ductilidad similar, donde la fibra actúa a medida que la apertura aumenta. Ante los resultados de estas tablas, se observa que entre  $4 \text{ kg/m}^3$  y  $8 \text{ kg/m}^3$ , se encuentran os valores esperados. No obstante al aumentar la cuantía de fibra a  $12 \text{ kg/m}^3$ , el comportamiento cambia, disminuyendo la tenacidad (área bajo la curva), pero aumentando la resistencia residual en los posteriores 30 mm de apertura, hasta en 15 kN, sin embargo, la modalidad de ambos ensayos es distinta, en cuanto a la rapidez, distribución de fibras en la grieta de carga y disposición de las probetas. Por lo que no otorga un resultado con similitudes cuantitativa, solo cualitativas como se aprecia en el *gráfico 5.4*.

--- ASTM (línea Roja).

--- EN (Línea Azul).

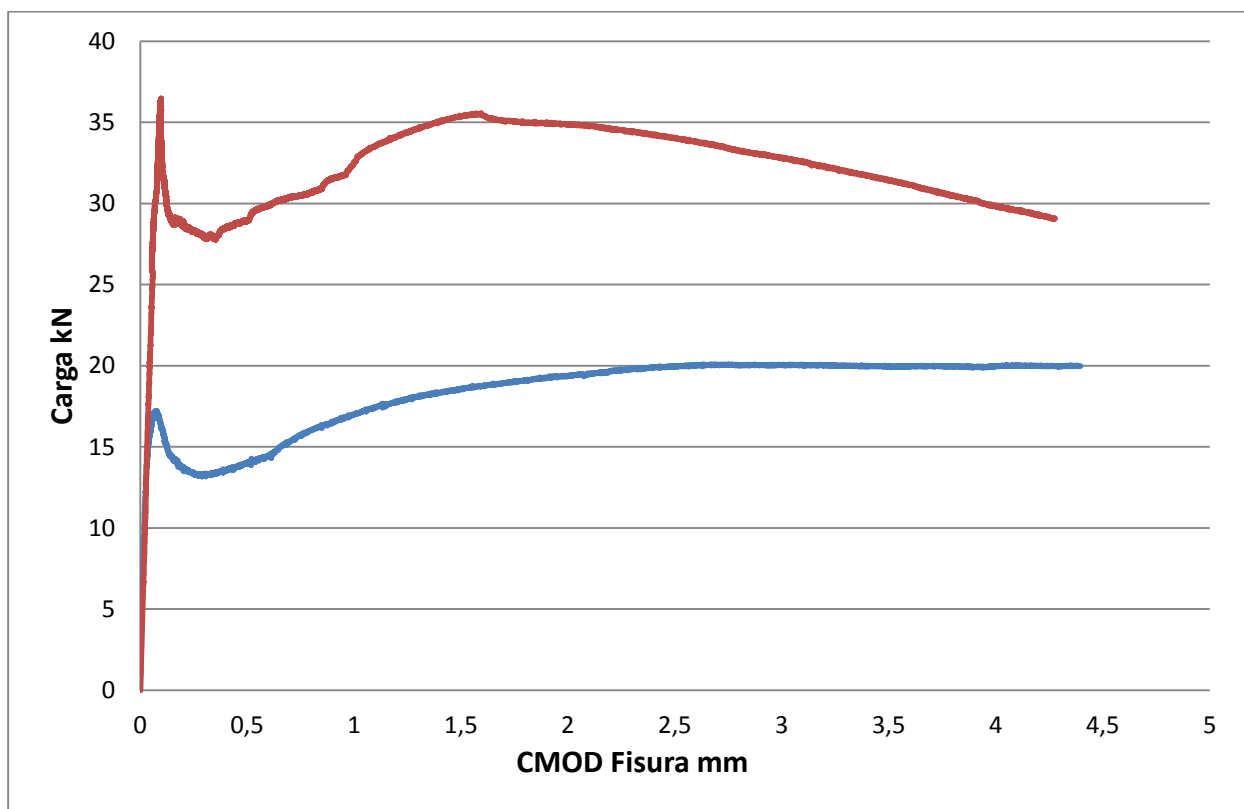


Gráfico 5.4) Comparación de gráficos representativo de ensayos ASTM (en rojo) y EN (en Azul) en los puntos de esfuerzo.

En estos gráficos se observa que en el ensayo ASTM presenta una mayor tenacidad que el ensayo EN, esto se debe a que en la primera al aplicar dos cargas se puede obtener una fisura mucho más representativa que figuren una mayor cantidad de fibras entre la rotura, en el otro ensayo dependía si en el punto donde se aplica la carga estuviesen bien distribuidas las fibras, de todos modos, el comportamiento dúctil de ambas es similar. A modo de reflejar esta conjetura, se aprecia en las *tablas 1 y 2 del capítulo 7, Anexos*, la cantidad de fibras que se obtuvieron en cada caso.

Para poder generar correlaciones se presenta una tabla de comparaciones entre el CMOD obtenido relacionado a la tenacidad y esfuerzo.

CMOD	FA-4kg		FA-8kg		FA-12kg	
	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)	t (J)	f(MPa)
<b>0,75</b>	7,78	3,09	8,54	5,74	15,88	10,44
<b>3</b>	24,81	4,47	39,16	7,67	82,85	13,55

Tabla 5.6) Tenacidades y esfuerzos respecto a un CMOD en diferentes cuantías de fibras.

A medida que aumentan las cuantías para un valor de CMOD característico los valores de tenacidad y esfuerzo van aumentando. Se puede apreciar que en cuanto a las tenacidades aumenta levemente pero luego aumenta al doble aproximadamente. Y el esfuerzo, al cambiar de cuantías, aumenta linealmente a poco menos del doble por cada aumento de fibra sintética.

Para mayor claridad en las curvas del Gráfico 5.5 se presenta la comparación de las 3 cuantías de fibras para ambos ensayos ASTM y EN.

- Ensayo ASTM de 4  $kg/m^3$
- Ensayo ASTM de 8  $kg/m^3$
- Ensayo ASTM de 12  $kg/m^3$

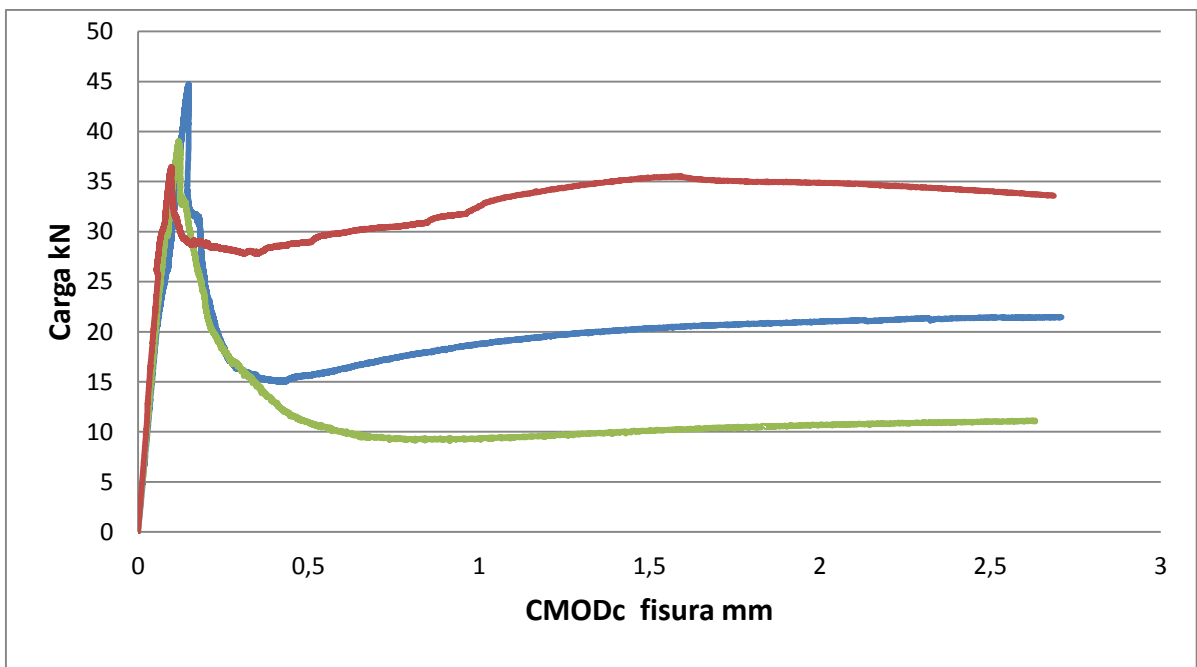


Gráfico 5.5) Comparación de gráficos de las 3 cuantías de fibras para ensayo ASTM.

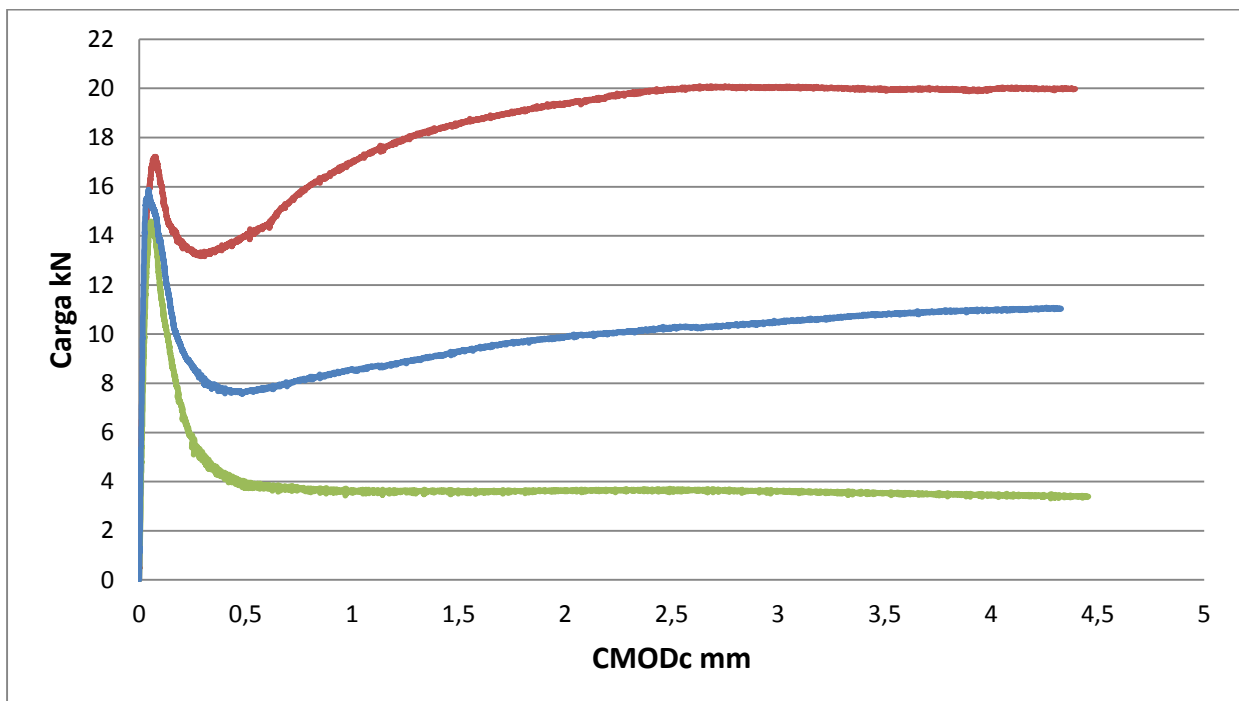


Gráfico 5.6) Superposición de gráficos de las 3 cuantías de fibras para ensayo EN.

En ambos gráficos, tanto la comparación de ensayos ASTM como EN, la cuantía de  $12 \text{ kg/m}^3$  supera con creces la tenacidad y la resistencia residual en las probetas ensayadas, esto permite concluir que para esta dosificación, dicha cantidad de fibra consigue un mejor comportamiento esperado en vigas post-fisuración. Un factor que contrasta estos resultados es la complejidad en cuanto a su trabajabilidad, sin embargo, el uso del aditivo superplastificante, permite una óptima manipulación del hormigón fresco en laboratorio.

#### 5.4 Cálculo de ensayo BCN

Las pruebas de Barcelona Generalizado fueron ejecutadas en una prensa universal Toni Technick de 3000 KN de capacidad accionada a través de una consola de control informatizada multifuncional modelo MCC8 marca CONTROLS®, la cual permite la introducción de parámetros y configuración del ensayo como velocidad de carga, sensibilidad máxima, parámetros geométricos, entre otros.

Los parámetros configurados corresponden a  $0,02 \text{ MPa/s}$  para la velocidad de carga,  $400 \text{ KN}$  de sensibilidad y como parámetro geométrico se introdujo la aplicación de carga a un medio cilindro de  $150 \times 150 \text{ mm}$ .

La carga aplicada se midió través de una celda de carga Tokio Sokki de  $200 \text{ KN}$  de capacidad y sensibilidad de  $1,596 \text{ mv/V}$  y 3 transductores LVDT. La celda y transductores fueron conectados a una fuente de poder y un adquisidor de datos registrados y controlados a través de un programa computacional.

Para fijar la probeta a la prensa de ensayo se utilizó un disco de protección de altura 2,5 cm bajo la celda de carga enseguida un punzón de 38 mm de diámetro (un cuarto del diámetro de la probeta) y 5 cm de altura que conecta con el cilindro a ensayar, a este punzón va fijado un disco de aluminio mediante tres tornillos. Enseguida viene la probeta y otro punzón debajo de ésta también con un disco de aluminio al cual van fijos los tres transductores LVDT distanciados a  $120^\circ$ .

El ensayo se aplicó a un total de 60 probetas, 20 para cada tipo de HRF. Como se era de esperar en el

estado pre – fisuración la matriz presentó un comportamiento lineal observándose antes de la carga máxima una no linealidad. Luego, en el estado post – fisuración se presenta el reblandecimiento afectado por la incorporación de fibra. En la fase final del ensayo se observó la aparición de 2, 3 o 4 grietas radiales en los especímenes. Estos ensayos se dividieron en 2 partes uno de punzonamiento y otro de cadena extenso métrica, solo se tomaron los resultados del ensayo por punzonamiento, para poder obtener valores de tenacidad y resistencia residual.



Imagen 5.5) Ensayo BCN Punzonamiento.

Las curvas medias de carga-desplazamiento axial total ( $P - \delta T$ ) hasta los 7 mm de  $12 \text{ kg/m}^3$  y de los 3 hormigones se presentan en los siguientes gráficos.

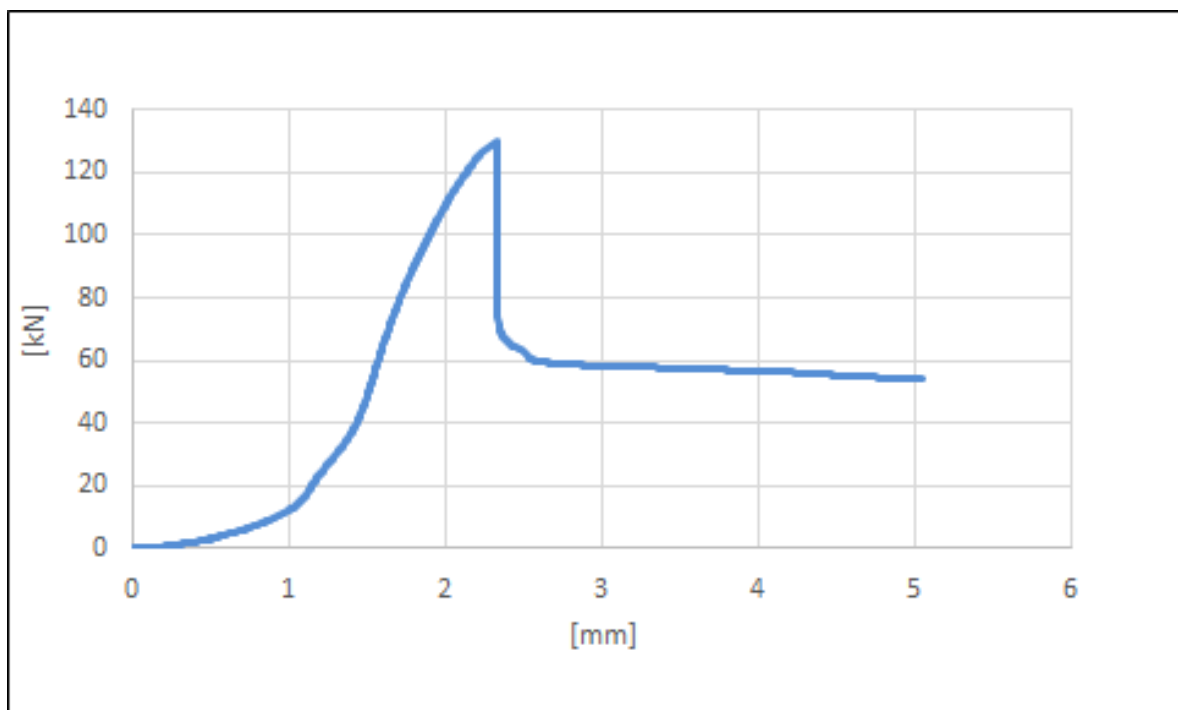


Gráfico 5.7) Curvas  $P - \delta T$  obtenida de HRF ensayados de  $12 \text{ kg/m}^3$  de cuantía.

- Ensayo BCN de  $4 \text{ kg/m}^3$
- Ensayo BCN de  $8 \text{ kg/m}^3$
- Ensayo BCN de  $12 \text{ kg/m}^3$

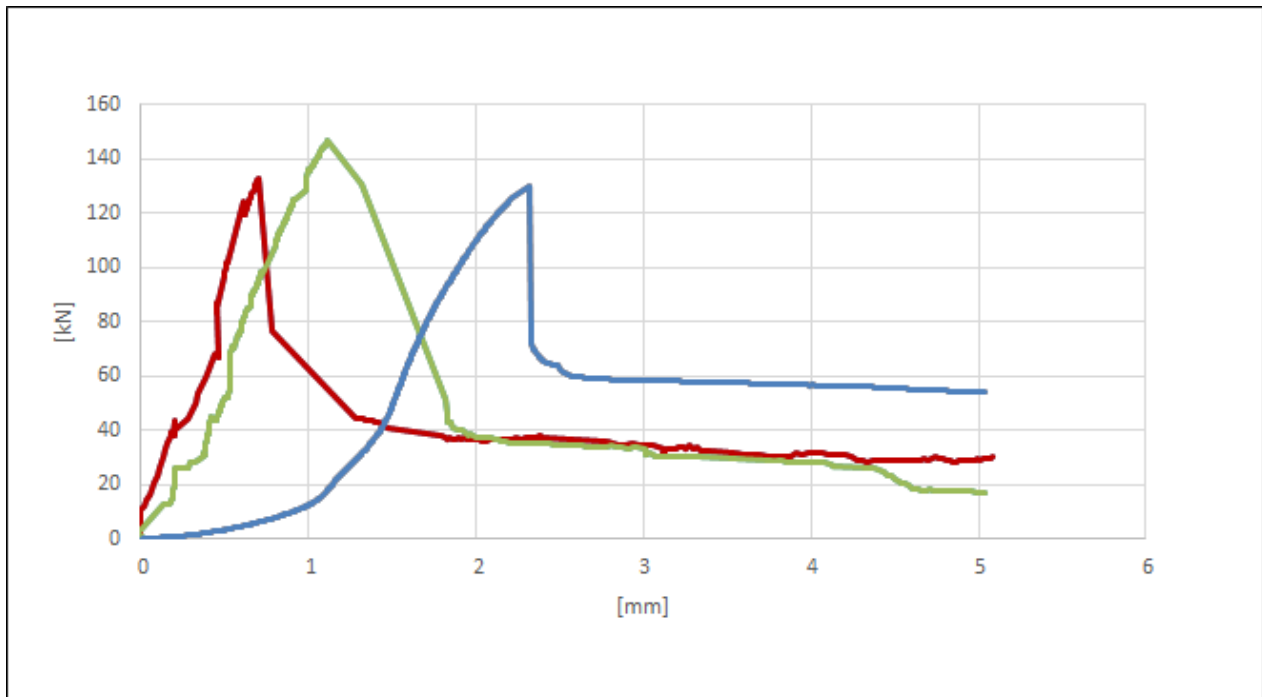


Grafico 5.8) Curvas P –  $\delta T$  típicas obtenidas de HRF ensayados con las 3 dosificaciones de fibras.

Al igual que los gráficos obtenidos en los ensayos de tracción la fibra de  $12 \text{ kg/m}^3$  en comparación a menores cuantías de fibra, es la única que iguala o supera en por lo menos un 15% su resistencia en el punto de fisura. Además la resistencia al punto de fisuramiento es menor que menores cuantías de fibras, sin embargo, tiene un comportamiento considerablemente más dúctil.

Bajo los cálculos asociados, se pueden desprender las *tablas 3.1, 3.2, 3.3, contenidas en el capítulo 7 Anexos*, con las siguientes nomenclaturas y donde las probetas gemelas se refiere a probetas de una misma amasada.

- $[KN] \text{ max.} = \text{Carga máxima,}$
- $[\mu m] \text{ Cmax.} = \text{Deformacion a la carga máxima.}$

Además en las *tablas 4.1, 4.2 y 4.3 del capítulo 7, Anexos*, se especifican en tablas lo valores que se obtienen con los siguientes parámetros en el ensayo de extensómetro.

- $[KN] \text{ max.} = \text{Carga máxima,}$
- $[KN] \text{ ext.} = \text{Valor de la carga, una vez que la probeta ha fallado y comienza la expansión diametral de la probeta. Cabe destacar que la deformación diametral no comienza instantáneamente una vez que ha fallado la probeta, sino que después que esta comienza}$
- ha deformarse diametralmente.
- $[\mu m] \text{ ini.} = \text{Valor inicial de la deformación diametral de la probeta.}$

Por medio de estas tablas mencionadas se escogen las curvas de mayor representatividad y desde el punto

de inicio de fractura se gráfica y comparan las diferentes probetas con cuantías de fibras ensayadas, modalidad BCN (extensómetro), las cuales se aprecian en el *grafico 5.10*.

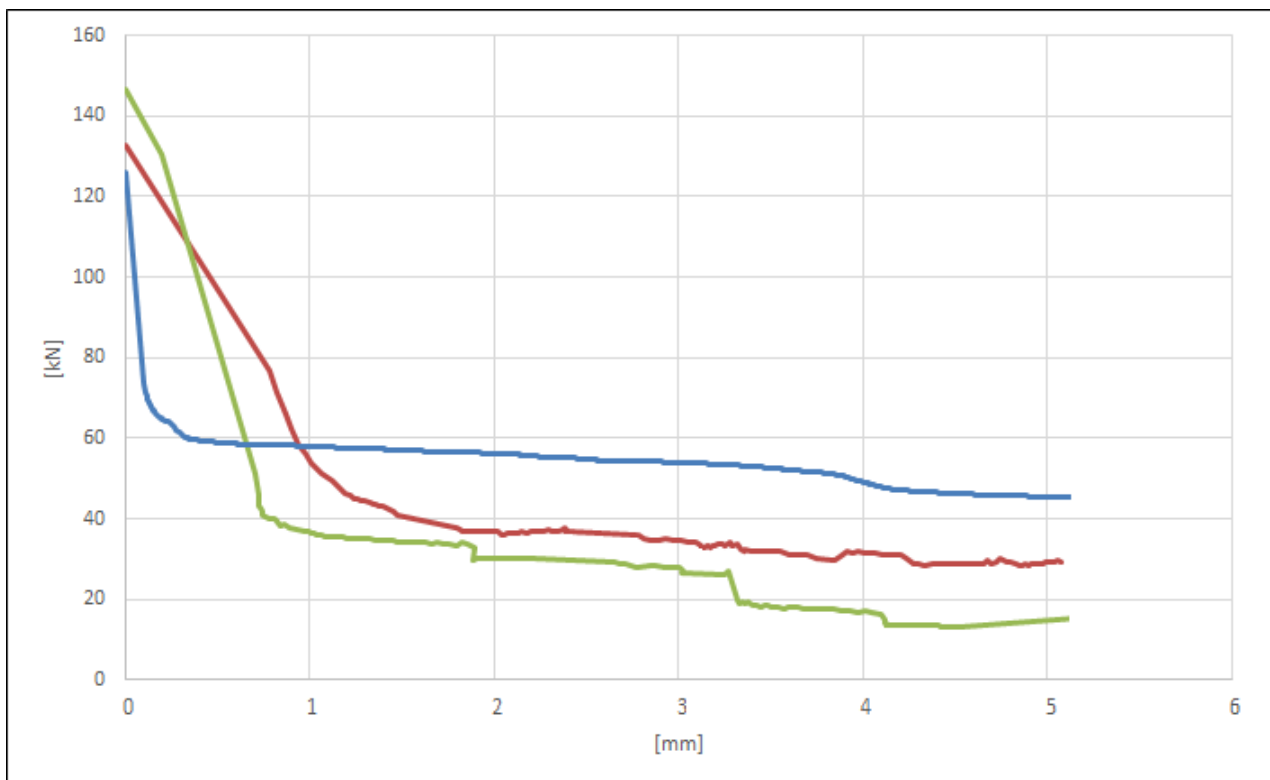


Grafico 5.10) Curvas obtenidas de las diferentes cuantías en ensayo BCN (extensómetro).

Se presenta el comportamiento desde su fractura hasta la rotura total la cual varía según la cuantía de fibras inmersas en el hormigón. No obstante, la ductilidad y tenacidad que se obtiene a mayor cantidad de fibra es notoria, lo que implica que a mayor cuantía de fibra mayor es la resistencia post fisuración. Resultado que concuerda con los ensayos de flexión mencionados anteriormente.

En la tabla se identifican los valores más representativos para las 3 cuantías de fibras y sus respectivos resultados de tenacidad y resistencia residual.

<b>FB1_4</b>	<b>N°</b>	<b>[KN] max.</b>	<b>[µm] Cmax.</b>	<b>t [J]</b>	<b>f[MPa]</b>
[1]	7	146	1112	8,55	1,16
[2]	8	160	1044	9,12	1,58
<b>FB2_8</b>	<b>N°</b>	<b>[KN] max.</b>	<b>[µm] Cmax.</b>	<b>t [J]</b>	<b>f[MPa]</b>
[1]	2	133	700	8,90	5,57
[2]	13	134	856	9,67	7,24
<b>FB3_12</b>	<b>N°</b>	<b>[KN] max.</b>	<b>[µm] Cmax.</b>	<b>t [J]</b>	<b>f[MPa]</b>
[1]	1	110	833	15,68	9,98
[2]	2	109	1043	20,23	11,56

Tabla 5.7) Tenacidades y esfuerzos en diferentes cuantías de fibras, ensayo BCN.

## Capítulo 6. Conclusiones

Tanto la comparación de ensayos ASTM como EN, la cuantía de  $12 \text{ kg/m}^3$  supera con creces la tenacidad y la resistencia residual en las probetas ensayadas, esto permite concluir que para esta dosificación, dicha cantidad de fibra consigue un mejor comportamiento esperado en vigas post-fisuración.

Por otro lado, por medio de este estudio es posible comprobar, que la trabajabilidad del hormigón es inversamente proporcional a la cantidad de fibra adicionada a la mezcla. Esta cualidad para fibras de  $12 \text{ kg/m}^3$  de cuantía es muy mala, lo cual dificulta el vaciado en el moldaje y su posterior vibrado, no obstante, la adición de aditivo superplastificante de 60CC a 150CC de “sika viscocrete” permite mejorar esta característica.

Una de las características más destacables de los hormigones confeccionados con fibras plásticas en diferentes cantidades, es su capacidad de absorber energía una vez producida la falla, es decir, estas probetas al ser sometidas a tensiones de cortes sin fibras, tienden a fallar de forma abrupta y catastrófica luego de la aparición de las primeras grietas. Sin embargo con la adición de fibras plásticas, una vez llegada a la carga máxima soportada, pueden seguir sufriendo grandes deformaciones antes de un colapso de la estructura, por lo cual el hormigón reforzado con fibras es considerado como un material dúctil.

Esta absorción de energías es calculada a partir del concepto de tenacidad absoluta, la cual es definida como el área bajo la curva de carga vs desplazamiento. Esta tenacidad se determina para cada probeta de hormigón, y a partir de estas se calcula el promedio por cada tipo de hormigón, encontrando que un hormigón con  $4 \text{ kg/m}^3$ , posee mayor tenacidad absoluta que un hormigón con  $8 \text{ kg/m}^3$ , siendo ambas superadas por el hormigón de  $12 \text{ kg/m}^3$ , esta incongruencia entre los hormigones F 4 y F 8, es producto de que el hormigón F 4 llega a un valor mayor de resistencia al corte, por lo que a pesar de que la curva registrada, para este hormigón luego de la carga máxima, decae con una mayor pendiente, esta registra mayor tenacidad absoluta que un hormigón F 8.

Se puede afirmar que la incorporación de fibras colabora a un retardo en el colapso de una viga de hormigón armado reforzado con fibras versus una que no la posee. Esto debido a que las fibras están distribuidas en el hormigón en todas las direcciones, esto colabora a una contención más eficiente de las fisuras que pueden producirse al enfrentarse a distintos esfuerzos y que pueden dejar una estructura fuera de servicio, lo que se traduce en una fragilidad del elemento.

En resumen, una mejora en el hormigón reforzado con fibras es visible en la curva Carga-Deformación, ya que se presenta un incremento en la capacidad de carga, retardando la aparición de fisuras, lo cual se traduce en una mejor ductilidad del elemento. En los ensayos, de alta cuantía de fibras, tiene un comportamiento considerablemente más dúctil que las menores cuantías, aumentando su resistencia residual en su estado post fisuración.

La forma correcta para poder comparar la acción mecánica de la cantidad de fibras es a través de índices adimensionales.

El primero de estos, es el índice de tenacidad, donde la acción de las fibras es caracterizada a través de valores relativos, diferenciando la resistencia otorgada por el hormigón, al trabajo hecho por las fibras plásticas

Estos índices aumentan a medida que se agregan fibras plásticas a la mezcla, pero su aporte real, va disminuyendo a medida que se aumenta la cantidad. Esto también es un factor a considerar al agregar fibras, ya que hasta cierto punto las fibras dejan de ser un factor determinante a la hora de querer mejorar un hormigón para distintas solicitudes de carga.

El segundo parámetro utilizado, es el de esfuerzos residuales, el cual demuestra la capacidad de las fibras de mantener cierta resistencia del hormigón luego de producida la falla de la probeta. A través de los gráficos presentados a partir del promedio de esfuerzos residuales individuales, es posible observar claramente el comportamiento de las curvas registrados en los ensayos. Donde claramente los hormigones a con mayor cantidad de fibras plásticas, mantiene mayor resistencia para mismos desplazamientos, posteriores al punto de falla.

En los gráficos se observa que en el ensayo ASTM alcanza una mayor resistencia residual que en el ensayo EN, esto se debe a que, en la primera al aplicar dos cargas se puede obtener una fisura mucho más representativa donde figuren una mayor cantidad de fibras entre las caras de la rotura, en el otro ensayo dependía si en el punto donde se aplica la carga estuviesen bien distribuidas las fibras.

De los resultados obtenidos para resistencias residuales en ensayo barcelona a distintos desplazamientos axiales  $\delta A$ , se concluye que para este tipo de hormigón con la dosificación estudiada, el aporte al incremento de resistencia residual que realizan las vigas con fibras  $12 \text{ kg/m}^3$  y  $8 \text{ kg/m}^3$  respecto a las  $4 \text{ kg/m}^3$  es mínimo, atribuyéndose este resultado principalmente a la esbeltez que presentan las fibras ( $l/d$ ).

En cuanto al aporte a resistencia residual que realiza el aumento de cuantía de fibras, se tiene que para el caso de las fibras  $4 \text{ kg/m}^3$  a  $8 \text{ kg/m}^3$  este tiene un aumento de alrededor del 7%. Para las fibras  $8 \text{ kg/m}^3$  a  $12 \text{ kg/m}^3$  se presenta una baja en la resistencia residual de alrededor de un 13 a 20 % Por lo tanto a esta escala el aumento de cuantía de fibras es despreciable. De los valores de tenacidad se obtiene que, aumenten en función de la cuantía, por lo que concuerda con lo presentado en los otros ensayos.

## Capítulo 7. Anexos

### 1. Resultado de ensayo de viga Norma ASTM C-1609

N° Ensayo	Viga	Distancia a grieta [cm]		Número de fibras	
		L1	L2	P1	P2
1	FA-1-4(6)-1	13,0	13,5	53	42
2	FA-1-4(3)-2	8,2	6,7	57	44
3	FA-1-4(6)-3	4,5	5,7	35	58
4	FA-1-4(6)-4	1,4	1,0	48	45
5	FA-1-4(3)-5	12,0	8,6	34	33
6	FA-1-4(3)-6	12,5	12,8	35	52
7	FA-1-4(1)-7	6,2	8,0	52	55
8	FA-1-4(3)-8	10,5	10,6	48	45
9	FA-1-4(1)-9	6,5	6,3	36	39
10	FA-1-4(6)-10	10,5	7,5	48	49
11	FA-1-4(6)-11	2,3	2,5	59	63
12	FA-1-4(2)-12	11,0	11,5	59	54
13	FA-1-4(8)-13	11,2	9,5	59	56
14	FA-1-4(2)-14	5,5	7,0	48	46
15	FA-1-4(2)-15	11,5	9,0	49	52
16	FA-2-8(1)-1	6,5	6,0	109	129
17	FA-2-8(2)-2	8,0	10,0	101	107
18	FA-2-8(1)-3	13,5	11,0	131	93
19	FA-2-8(5)-4	5,5	4,5	118	115
20	FA-1-4(8)-16	2,0	5,5	54	36
21	FA-2-8(4)-5	6,5	3,5	59	63
22	FA-2-8(3)-6	4,0	4,0	72	100
23	FA-2-8(6)-7	1,5	0,5	117	111
24	FA-1-4(2)	14,5	12,0	81	91
25	FA-2-8(7)-8	1,5	0,0	103	113
26	FA-1-4(4)	1,0	5,0	53	75
27	FA-1-4(8)17	2,5	2,8	47	41
28	FA-2-8(7)-9	7,5	7,0	106	103
29	FA-2-8(6)-10	8,0	6,0	113	106
30	FA-2-8(8)-11	4,0	3,5	83	81
31	FA-1-4(5)18	3,5	4,5	43	34
32	FA-2-8(6)-12	10,5	11,5	113	116
33	FA-2-8(6)-13	7,5	10,0	141	93
34	FA-2-8(8)-14	10,5	9,5	107	105
35	FA-3-12(3)-1	7,5	7,5	135	144
36	FA-3-12(3)-2	14,0	14,5	142	137
37	FA-3-12(2)-3	2,5	2,0	136	141
38	FA-3-12(p)-4	1,0	5,5	143	139
39	FA-3-12(6)-5	14,5	13,5	168	154
40	FA-3-12(5)-6	14,5	10,5	132	118
41	FA-1-4(5)-19	10,5	9,5	51	55
42	FA-3-12(4)-7	6,0	7,0	129	111
43	FA-3-12(2)-8	14,0	15,0	130	125
44	FA-3-12(4)-9	13,0	14,0	116	134
45	FA-3-12(p)-10	8,0	10,5	162	158
46	FA-3-12(2)-11	11,5	13,5	139	143
47	FA-2-8(8)-15	6,5	6,0	118	109
48	FA-3-12(7)-12	14,0	14,0	124	126
49	FA-3-12(7)-13	4,5	1,0	122	109
50	FA-3-12(5)-14	11,0	9,0	120	141
51	FA-3-12(4)-15	4,0	7,5	139	125
52	FA-3-12(4)-16	12,0	12,5	149	154

53	FA-3-12(6)-17	3,0	5,0	89	134
54	FA-2-8(1)-16	5,0	3,0	123	98
55	FA-3-12(5)-18	14,0	14,5	146	120
56	FA-2-8(5)-17	4,5	5,0	98	123
57	FA-1-4(4)-20	9,5	8,5	56	41
58	FA-3-12(6)-19	9,5	5,0	158	132
59	FA-3-12(7)-20	11,0	7,0	142	121
60	FA-2-8(1)-18	11,0	10,5	113	92
61	FA-2-8(P)	3,5	2,0	90	107
62	FA-2-8(3)-19	5,0	5,0	100	104
63	FA-3-12(3)-21	7,5	6,0	141	128
64	FA-1-4(1)-21	6,5	7,0	52	45
65	FA-2-8(3)-20	8,5	5,5	93	113

Tabla 7.1). Resultados d ensayo vigas ASTM.

2. Resultado de ensayo de viga Norma EN 14651.

N° Ensayo	Viga	Profundidad entalla [cm]		
		Lado 1	Lado 2	Promedio
1	FE-1-4(2)-1	3,00	2,80	2,90
2	FE-1-4(2)-2	2,80	2,40	2,60
3	FE-1-4(5)-3	2,70	2,70	2,70
4	FE-1-4(3)-4	2,60	2,70	2,65
5	FE-1-4(4)-5	2,60	2,50	2,55
6	FE-1-4(1)-6	2,60	2,80	2,70
7	FE-1-4(5)-7	2,80	2,60	2,70
8	FE-1-4(4)-8	2,70	2,80	2,75
9	FE-1-4(5)-9	2,90	2,70	2,80
10	FE-1-4(1)-10	2,50	2,70	2,60
11	FE-2-8(6)-1	2,00	2,10	2,05
12	FE-2-8(4)-2	2,20	2,40	2,30
13	FE-2-8(4)-3	2,20	2,40	2,30
14	FE-2-8(4)-4	2,40	2,30	2,35
15	FE-3-12(1)-1	2,10	2,30	2,20
16	FE-3-12(1)-2	2,10	2,00	2,05
17	FE-3-12(1)-3	1,90	2,10	2,00
18	FE-1-4(7)-11	1,90	2,10	2,00
19	FE-1-4(7)-12	2,30	2,10	2,20
20	FE-1-4(7)-13	2,40	2,10	2,25
21	FE-1-4(7)-14	1,90	2,10	2,00
22	FE-1-4(7)-15	2,20	2,10	2,15
23	FE-2-8(8)-5	2,50	2,60	2,55
24	FE-3-12(4)-4	2,60	2,80	2,70
25	FE-2-8(7)-6	2,70	2,50	2,60
26	FE-3-12(1)-5	2,30	2,50	2,40
27	FE-3-12(3)-6	2,40	2,50	2,45
28	FE-3-12(3)-7	2,10	2,20	2,15
29	FE-2-8(9)-7	2,30	2,50	2,40
30	FE-3-12(2)-8	2,10	2,20	2,15
31	FE-2-8(8)-8	2,60	2,80	2,70
32	FE-2-8(1)-9	2,80	2,50	2,65
33	FE-2-8(7)-10	2,60	2,90	2,75
34	FE-2-8(3)-11	2,50	2,70	2,60
35	FE-2-8(2)-12	2,60	1,90	2,25
36	FE-2-8(3)-13	2,70	2,90	2,80
37	FE-3-12(2)-9	2,60	2,20	2,40

Tabla 7.2). Resultados d ensayo vigas EN.

7.3)

[KN] max. = Carga máxima,

[μm] Cmax. = Deformación a la carga máxima.

Ensayos Barcelona FB1-4									
FB1_4	N°	[KN] max.	[μm] Cmax.			FB1_4	N°	[KN] max.	[μm] Cmax.
[8]	1	121,8	1149	Probetas Gemelas		[1]	7	146	1112
[3]	2	122,9	1729			[1]	8	160	1044
[5]	3	116,9	635			[2]	4	143	602
[2]	4	143	602			[2]	5	148	889
[2]	5	148	889			[3]	2	122,9	1729
[3]	6	119	1067			[3]	6	119	1067
[1]	7	146	1112			[3]	9	134	796
[1]	8	160	1044			[3]	10	134	1341
[3]	9	134	796			[5]	3	116,9	635
[3]	10	134	1341			[6]	12	124	859
[8]	11	120,9	1253			[8]	1	121,8	1149
[6]	12	124	859			[8]	11	120,9	1253

Tabla 7.3.1) Valores de carga y deformación máxima obtenidas en ensayo punzonamiento de  $4 \frac{kg}{m^3}$  de cuantía.

Ensayos Barcelona FB2-8									
FB2_8	N°	[KN] max.	[μm] Cmax.			FB2_8	N°	[KN] max.	[μm] Cmax.
[7]	1	137	618	Probetas Gemelas		[1]	2	133	700
[1]	2	133	700			[1]	13	134	856
[7]	3	131	690			[2]	11	165	1088
[4]	4	179	929			[3]	5	183	986
[3]	5	183	986			[3]	10	161	921
[5]	6	166	1202			[4]	4	179	929
[8]	7	130	890			[5]	6	166	1202
[5]	8	166	1110			[5]	8	166	1110
[5]	9	155,9	1063			[5]	9	155,9	1063
[3]	10	161	921			[7]	1	137	618
[2]	11	165	1088			[7]	3	131	690
[8]	12	167,9	806			[8]	7	130	890
[1]	13	134	856			[8]	12	167,9	806

Tabla 7.3.2) Valores de carga y deformación máxima obtenidas en ensayo punzonamiento de  $8 \frac{kg}{m^3}$  de cuantía.

Ensayos Barcelona FB3-12									
FB3_12	N°	[KN] max.	[μm] Cmax.			FB3_12	N°	[KN] max.	[μm] Cmax.
[5]	1	110	833	Probetas Gemelas		[5]	1	110	833
[5]	2	109	1043			[5]	2	109	1043
[5]	3	104	986			[5]	3	104	986

Tabla 7.3.3) Valores de carga y deformación máxima obtenidas en ensayo punzonamiento de  $12 \frac{kg}{m^3}$  de cuantía.

7.4)

$[KN]_{max.} = \text{Carga máxima},$

$[KN]_{ext.} =$  Valor de la carga, una vez que la probeta ha fallado y comienza la expansión diametral de la probeta. Cabe destacar que la deformación diametral no comienza instantaneamente una vez que ha fallado la probeta, sino que después que esta comienza ha deformarse diametralmente.

$[\mu m]_{ini.} =$  Valor inicial de la deformación diametral de la probeta.

Ensayos Con Extensometro FB1-4										
FB1_4	N°	[KN] max.	[KN] ext.	[μm] ini.		FB1_4	N°	[KN] max.	[KN] ext.	[μm] ini.
[8]	1	131	15	12,6	Probetas Gemelas	[1]	6	153	32	32
[8]	2	121	26,9	16		[1]	9	146	29	29
[8]	3	119,6	20,2	72,6		[2]	7	150	25,63	25,63
[6]	4	155	39,95	3		[5]	8	148	30	30
[6]	5	149	19	13,37		[6]	4	155	39,95	39,95
[1]	6	153	32	15,2		[6]	5	149	19	19
[2]	7	150	25,63	41,7		[8]	1	131	15	15
[5]	8	148	30	192		[8]	2	121	26,9	26,9
[1]	9	146	29	14,48		[8]	3	119,6	20,2	20,2
[8]	10	120,9	35	29		[8]	10	120,9	35	35
[8]	11	129,7	23	392		[8]	11	129,7	23	23

Tabla 7.4.1) Valores de carga y deformación máxima obtenidas en ensayo extensometro de  $4 \frac{kg}{m^2}$  de cuantía.

Ensayos Con Extensometro FB2-8										
FB2_8	N°	[KN] max.	[KN] ext.	[μm] ini.		FB2_8	N°	[KN] max.	[KN] ext.	[μm] ini.
[6]	1	160	38,8	5,65	Probetas Gemelas	[1]	4	141,5	28	3
[6]	2	165,6	34,9	5,65		[1]	9	150	36	21,8
[7]	3	119,9	31	4,9		[2]	5	157	16,5	2,7
[1]	4	141,5	28	3		[2]	13	163	29	1,6
[2]	5	157	16,5	2,7		[3]	6	162	16	11,5
[3]	6	162	16	11,5		[3]	10	160,7	25	75,5
[6]	7	112	30	10		[5]	11	156	59,97	6,75
[8]	8	174	33	0,13		[6]	1	160	38,8	5,65
[1]	9	150	36	21,8		[6]	2	165,6	34,9	5,65
[3]	10	160,7	25	75,5		[6]	7	112	30	10
[5]	11	156	59,97	6,75		[6]	12	153,6	28	6
[6]	12	153,6	28	6		[7]	3	119,9	31	4,9
[2]	13	163	29	1,6		[8]	8	174	33	0,13

Tabla 7.4.2) Valores de carga y deformación máxima obtenidas en ensayo extensometro de  $8 \frac{kg}{m^2}$  de cuantía.

Ensayos Con Extensometro FB3-12										
FB3_12	N°	[KN] max.	[KN] ext.	[μm] ini.		FB3_12	N°	[KN] max.	[KN] ext.	[μm] ini.
[5]	1	152,9	42	8,5	Probetas Gemelas	[5]	1	152,9	42	8,5
[6]	2	99	45,9	1,23		[6]	2	99	45,9	1,23
[6]	3	130	40,5	17		[6]	3	130	40,5	17

Tabla 7.4.3) Valores de carga y deformación máxima obtenidas en ensayo extensometro de  $12 \frac{kg}{m^3}$  de cuantía.

## Capítulo 8. Referencias

- Manual Técnico. Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón, MACCAFERRI.
- Aenor (2010), UNE 83 – 515 Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Ensayo Barcelona, Madrid, España, 8 pp.
- ASTM Internacional (2010), C 1609 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). 9pp.
- Carmona S, Aguado A, Molins C, (2011) Generalization of the Barcelona Test for the Toughness Control of FRC, aceptado por Materials and Structures, mayo 2011.
- Concrete. Hormigón reforzado con fibras. Building Trust SIKA.
- Comportamiento mecánico a escala real de un piso industrial de hormigón reforzado con fibras sintéticas. Paolo Chioma Valenzuela. Gerente Técnico EPC.

