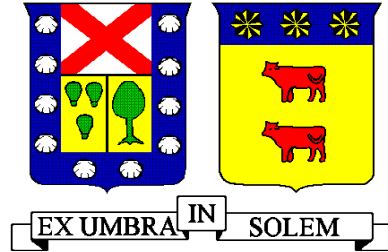


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE HORMIGONES REFORZADOS CON CUANTÍAS MEDIAS
DE FIBRAS SINTÉTICAS.

CRISTOPHER LUIS CAMPOS VARGAS

Memoria para optar al título de
Constructor civil

Profesor Guía
Sergio Carmona Malatesta

Julio del 2016

AGRADECIMIENTOS.

Primeramente, doy gracias a Dios por esta hermosa bendición, toda honra y gloria es para él.

Agradecer a mi familia por su apoyo incondicional y lucha continua por mantenerme fuera del hogar tantos años, a mi hermana por estar junto a mi cuando más lo necesite. Especialmente a mis padres, por su apoyo incondicional, paciencia y enorme dedicación para superar en conjunto esta difícil carrera que emprendí hace tantos años.

Finalmente, agradecer a mi polola por luchar codo a codo junto a mí, desde el comienzo de este proceso. Te amo.

DEDICATORIA:

*A mis padres,
este logro es fruto de su esfuerzo.*

RESUMEN.

Dentro de la construcción, el hormigón forma una parte fundamental en variados procesos constructivos, es por esto que una de las innovaciones del último tiempo ha sido integrar en sus procesos al Hormigón Reforzado con Fibra, respondiendo a la abreviatura de "HRF" el cual tiene como respuesta una significativa mejora ante las cargas que actúan usualmente sobre el hormigón y su resistencia (compresión, tracción y flexo tracción).

El principal objetivo de los HRF, es entregarle al hormigón la capacidad de soportar mayores deformaciones antes de llegar a la completa rotura, transformándose así en un material más dúctil gracias al agregado de fibra sintética, permitiéndole absorber una cantidad mayor de energía en comparación a otros hormigones tradicionales, entregando como resultado esperado altos índices de tenacidad.

Actualmente se cuestiona el carácter de estructural de las fibras sintéticas que se utilizan para reforzar hormigones, debido a que los resultados de ensayos con cuantías bajas a medias de fibras exhiben un comportamiento clasificado como ablandamiento intenso a ligero, de acuerdo al Código Modelo MC 2010. No obstante, estas fibras están siendo ampliamente utilizadas para el refuerzo de shotcrete en la construcción de túneles en faenas mineras y centrales hidroeléctricas. (*Sergio Carmona Malatesta, 2016*)

Los ensayos de HRF bajo las normas EN-14651 y ASTM C-1609, permiten controlar la carga aplicada y registrar la deformación gradual de la probeta permitiendo, con el análisis de datos, entregar como resultados valores de Resistencia Residual a la tracción por flexión. Estas son inferidas a través de valores de carga y apertura CMOD de la fisura resultante, o carga y deflexión al centro del campo con la aplicación de cargas puntuales a las cuales son sometidas las probetas. De acuerdo al análisis de estos resultados es posible clasificar el carácter estructural de las fibras sintéticas.

Por último, esta investigación tiene como finalidad ser un aporte a futuras tecnologías para el Hormigón, ayudando a orientar a próximos lectores interesados en conocer el comportamiento de los HRF en distintas dosificaciones, por lo cual a lo largo de esta campaña experimental se incluirán las normativas de los ensayos e imágenes de los procedimientos en el laboratorio.

ABSTRACT.

In construction, the concrete forms a key part in various construction processes, which is why one of the innovations of recent times has been integrated into their processes to Fibre Reinforced Concrete, responding to short for "HRF" which has significant improvement in response to the loads acting on the concrete usually and resistance (compression, tension and flexion traction).

The main objective of the HRF, is to give the concrete the ability to withstand greater deformation before reaching complete rupture, thus becoming a more ductile material thanks to the addition of synthetic fiber, allowing it to absorb a greater amount of energy compared to other traditional concretes, delivering expected results in high levels of toughness.

The character of structural synthetic fibers used to reinforce concrete is now questioned because test results with low amounts half of fibers exhibit a classified behavior as intense a slight softening, according to the Model Code MC 2010. However, these fibers are being widely used for reinforcing shotcrete in tunnel construction in mining and hydroelectric plants tasks. (*Sergio Carmona Malatesta, 2016*)

Tests HRF under EN-14651 and ASTM C-1609 standards to control the applied load and record the gradual deformation of the specimen allowing, with data analysis, delivered as results values Residual Tensile bending. These are values inferred through load and CMOD opening of the resulting fissure, or load and deflection at midfield with the implementation of specific loads to which they are subjected the specimens. According to the analysis of these results it is possible to classify the structural nature of synthetic fibers.

Finally, this research is intended as a contribution to future technologies for Concrete, helping to guide next readers interested in the behavior of FRC in different dosages, so throughout this experimental campaign regulation will be included of the tests and imaging procedures in the laboratory.

GLOSARIO.

- **Abrazadera:** Elemento instalado en la parte inferior de las probetas prismáticas con el fin de sujetar el transductor lector de desplazamientos.
- **Desplazamiento del borde de la fisura (CMOD):** Desplazamiento lineal medido por un transductor sobre un prisma sometido a una carga puntual centrada.
- **Flexo tracción:** Ensayo de tracción que consiste en la rotura de una probeta prismática mediante la aplicación de una carga a flexión.
- **HRF:** Hormigón reforzado con fibras, material resultante al agregar fibras al proceso de moldeo de hormigón.
- **Shotcrete:** Hormigón proyectado en inglés.
- **Refrentar:** Procedimiento de aplicación y moldeo de la capa de llenado sobre una superficie de carga en una probeta de hormigón, destinado a corregir defectos de paralelismo entre caras con el fin de obtener la mejor coincidencia posible entre las piezas de apoyo y carga de la prensa de ensayo y una distribución uniforme de tensiones durante la aplicación de la carga.
- **Resistencia Residual a la tracción por flexión:** Tensión ficticia en el fondo de la entalla que se supone actúa, en el caso de una distribución lineal de tensiones, en una sección no agrietada en el centro de vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada.
- **Tenacidad:** Energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura, por acumulación de deformaciones. En la mineralogía la tenacidad es la resistencia que opone un mineral u otro material a ser roto, molido, doblado, desgarrado o suprimido, siendo una medida de su cohesión.
- **CMOD:** Desplazamiento de apertura de los bordes de la fisura.
- **Flecha:** Desplazamiento lineal, medido por un transductor instalado sobre un prisma sometido a una carga puntual centrada F.
- **LOP, Limite de proporcionalidad:** Tensión en el fondo de la entalla que actúa en una sección no agrietada del centro del vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada F.

INDICE GENERAL.

Tabla de contenidos.

AGRADECIMIENTOS.....	2
DEDICATORIA:.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
GLOSARIO.....	6
INDICE GENERAL.....	7
I – INTRODUCCION.....	9
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Objetivos Generales.....	10
1.3 Objetivos Específicos.....	10
II - MARCO TEORICO.....	11
2.1 Hormigón reforzado con Fibra (HRF).....	11
2.2 Criterios para dosificar el HRF.....	13
2.3 Acciones y coeficientes de seguridad.....	14
2.4 Clasificación general de las fibras.....	14
2.5 Fibras poliméricas o sintéticas.....	14
2.6 Aplicaciones varias de los HRF.....	16
2.6.1 Pisos y pavimentos.....	16
2.6.2 Prefabricados.....	17
2.6.3 Shotcrete.....	18
2.6.4 Hormigones resistentes a explosiones.....	19
2.7 HRF y su resistencia a la Flexotracción.....	20
2.8 Ensayo a la flexotracción según la norma EN-14651.....	23
2.8.1 Expresión de los resultados.....	26
2.9 Ensayo a la flexotracción según la norma ASTM C-1609.....	29
2.9.1 Expresión de los resultados.....	32
III - CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	34
IV – DATOS EXPERIMENTALES.....	37
4.1 Cemento.....	37

4.2 Agregados Pétreos.....	38
4.3 Aditivo Viscocrete 5100 CL.....	40
4.4 Fibra Sintética EPC Barchip 54.....	42
4.5 Dosificación.....	43
V - PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO.....	45
5.1 Preparación de materiales y herramientas.....	45
5.2 Hormigonado de las probetas.....	47
5.3 Curado de las probetas.....	48
5.4 Realización de Ensayos a Flexo Tracción.....	50
5.4.1 Ensayo bajo la normativa EN-14651.....	50
5.4.2 Ensayo bajo la normativa ASTM C-1609.....	53
5.4.3 Parámetros de los ensayos.....	55
VI – RESULTADOS.....	58
6.1 Resumen de resultados para el ensayo EN-14651.....	58
6.1 Resumen de resultados para el ensayo ASTM C-1609.....	60
VII – ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	62
7.1 Análisis de los resultados para el ensayo EN-14651.....	62
7.2 Análisis de los resultados para el ensayo ASTM C-1609.....	67
VIII – CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS.....	76
ANEXOS.....	78
Anexo: Resultados ensayos EN-14651 dosificación 8 [kg/m ³].....	78
Anexo: Datos según ensayo EN-14651 dosificación 4 [kg/m ³].....	90
Anexo: Resultados ensayos ASTM C-1609 dosificación 8 [kg/m ³].....	91
Anexo: Datos según ensayo ASTM C-1609 dosificación 4 [kg/m ³].....	102

I – INTRODUCCION

1.1 Antecedentes.

La industria de la construcción y su tecnología a nivel mundial, han avanzado de manera importante durante las últimas dos décadas, de modo que, las numerosas investigaciones científicas sobre los materiales de construcción y nuevas normas internacionales, están trazando el camino para el desarrollo de novedosas tecnologías de ensaye de materiales. *(Alessandro D'Amico 2012)*

Con el conocimiento adquirido en las últimas décadas, además de 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 cuales se encuentran las fibras. Es muy importante que los usuarios entiendan que existen parámetros mínimos que debe cumplir un HRF de acuerdo a estas normativas y guías de diseño, para ser considerado como estructural.

Las fibras sintéticas ayudan a mejorar el desempeño del hormigón en el estado plástico, son agregadas a la mezcla para incrementar la resistencia a la flexión postfisuración. Esta característica está asociada a la capacidad de absorber energía después del agrietamiento. Cabe destacar que la Sociedad Americana de Ensayo de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) tiene dos métodos para evaluar la tenacidad del concreto proyectado con fibras: la Norma C1609/C1609M, y la C1550. También existen otras entidades como el Comité Europeo de Normalización (CEN, por sus siglas en francés) que propone el método EN 14488-5, y el método dado por la RILEM TC 162-TDF, actualmente norma europea EN 14651. Existen por supuesto, otros procedimientos de ensayo (el método JSCE-SF4 de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles) sin embargo, los anteriores son los más utilizados. *(Construcción y Tecnología en Concreto, Julio 2012)*

Actualmente, el ensayo de flexión en vigas prismáticas de hormigón reforzado con fibras (HRF), se utiliza con mucha frecuencia. La prueba evalúa el rendimiento a la flexotracción de los parámetros de resistencia derivada del HRF en términos de área bajo la curva de carga-deflexión, obtenida mediante pruebas de una viga simple con puntos de carga. La curva proporciona la evaluación de la capacidad de absorción de energía de la viga y su magnitud depende directamente de las características geométricas de la misma viga, así como del sistema de carga que se considere. La prueba de flexión puede ser representada por la relación entre la carga y la deflexión, según la norma ASTM C1018/C1609, o entre la carga y la apertura de la fisura (CMOD, que proviene del inglés: Crack Mouth Opening Displacement) de una viga entallada según la norma EN 14651. En el primer caso, el área bajo la curva carga-deflexión se calcula para diferentes valores de desplazamientos. En el segundo caso, la resistencia residual a la tracción por flexión se evalúa para valores especificados de la apertura de fisura. *(Alessandro D'Amico, 2012).*

Debido a la naturaleza del hormigón, este presenta una serie de defectos y fisuras in ternas. 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 de 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, como, por ejemplo, una fibra. (*Paolo Chioma Valenzuela, Comportamiento mecánico del hormigón con fibras sintéticas, 2012*)

El comportamiento a tracción del hormigón con adición de fibras, se evalúa en términos de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión, determinados a partir de la curva carga-desplazamiento del borde de la fisura o de la curva carga-flecha, obtenidas aplicando una carga puntual centrada o carga a los tercios, sobre una probeta prismática simplemente apoyada.

1.2 Objetivos Generales.

La finalidad de este estudio, es conocer el comportamiento del hormigón reforzado con fibras sometido a ensayos de flexotracción bajo la normativa europea EN-14651 y la ASTM C-1609. Se pretende analizar el efecto que produce la fibra sintética “EPC Barchip-54” sobre la resistencia del hormigón y su tenacidad.

Comparar los resultados de la dosis intermedias y bajas de fibras añadidas a las amasadas de hormigón confeccionado, determinando las resistencias residuales competentes tras cada uno de los ensayos, obtenido las resistencias características y equivalentes de cada hormigón.

Realizar un análisis comparativo, que permita determinar las condiciones características de un hormigón aportadas por las fibras de bajas e intermedias dosificaciones y clasificar su comportamiento de acuerdo a estos valores.

Finalmente, se podrá caracterizar el hormigón reforzado con una cuantía media de fibras y verificar si cumple con los requisitos establecidos para las fibras estructurales.

1.3 Objetivos Específicos.

Confeccionar probetas prismáticas de hormigón reforzado con fibras sintéticas de dosificación intermedia, con el que se moldearan probetas de acuerdo a las especificaciones de cada norma. Estas se someterán a ensayos y con los resultados obtenidos se calcularán los parámetros que permitan verificar si cumplen con los requisitos establecidos para las fibras de uso estructural.

II - MARCO TEORICO.

2.1 Hormigón reforzado con Fibra (HRF).

El hormigón tradicional posee algunas desventajas, como lo son la baja resistencia a la tracción, a la ductilidad y la poca capacidad de absorción de energía. Mientras más alta sea la resistencia del hormigón más incrementan gradualmente estas desventajas volviéndose notoriamente significativas. Para ayudar a disminuir estos inconvenientes en el hormigón se le agregan diversas dosificaciones de fibra plástica para mejorar así sus propiedades mecánicas, Durante el proceso de mezclado de los áridos, el cemento y aditivos se adhiere la fibra, consiguiendo una notable mejoría en las debilidades antes mencionadas.

Las fibras plásticas son un tipo de aditivo en el que sus cantidades por volumen varían dependiendo del tipo de fibra y de la finalidad que se quiere lograr con el hormigón. Estas son de corta longitud y pequeña sección, por tanto, se adhieren fácilmente a la amasada de hormigón.

Los HRF pueden tener finalidades de carácter estructural o no estructural. Son de carácter estructural cuando se toma en cuenta su contribución en los cálculos relativos al estado límite último o de servicio, esto quiere decir que proporcionan mayor energía para resistir la rotura y dichas fibras pueden sustituir parcial o totalmente la armadura de la sección. Son de carácter no estructural cuando las fibras mejoran otros aspectos de la sección como es la resistencia al fuego o el control de la fisuración o la retracción.

La cantidad de fibra que se agrega a una mezcla de hormigón se determina según el volumen total de los compuestos (hormigón y fibras) denominada fracción volumétrica (V_f).

La fibra que se agrega al hormigón es considerada como un árido, aunque no aporta directamente a la resistencia característica del hormigón, pero si, dependiendo de la dosificación de fibra que se utilice, puede aumentarla. La mayor respuesta de la fibra se ve reflejada en el estado post – fisuración en donde el aporte que éstas hacen tiene relación con disminuir la apertura de fisuras, aumentar la tenacidad y el control de proceso de fisuración y resistencia a la flexotracción.

La naturaleza y la particularidad de las fibras determinan la efectividad de la acción reforzante deseada y de la eficacia de su transmisión de energía. Es importante destacar que la orientación de las fibras en el aglomerante es fundamental, puesto que los mayores beneficios se obtienen cuando la fibra se posiciona paralela al esfuerzo de tracción aplicado y cuando se orienta al azar, es menor la influencia. En la *Figura 2.1* se muestra una distribución aleatoria de fibra EPC Barchip-54.



Figura 2.1.: Distribución de fibras en probeta de hormigón.

Un hormigón tradicional (sin refuerzo de fibras) es capaz de resistir las solicitaciones hasta un determinado punto, denominado peak de carga, posterior a ese punto, el hormigón falla de manera abrupta debido a su fragilidad especialmente ante solicitaciones de tracción.

Una de las características que identifica a los hormigones reforzados con fibras es su capacidad de absorber energía, a diferencia de los hormigones tradicionales, tal como se puede apreciar en la *Figura 2.2*. Se observa que estos HRF, aumentan su ductilidad, soportando mayores deformaciones y evitando roturas del tipo frágil. Debido a esta capacidad, se generan beneficios en la resistencia a la fractura, impacto y fatiga.

Justo en el momento post agrietamiento es donde se presenta la capacidad para absorber energía y por tanto soportar las solicitaciones por un rango de tiempo mucho mayor, evitando de esta forma las roturas abruptas que pueden hacer colapsar al hormigón.

La *Figura 2.2* representa gráficamente la diferencia de curva entre un hormigón reforzado con fibras y un hormigón tradicional. Se aprecia el mismo comportamiento antes de la primera falla, posterior al agrietamiento, la fibra comienza a actuar y el HRF demuestra mayor tenacidad. (*Revista Ingeniería de Construcción Vol.24 N°1, Abril de 2009*).

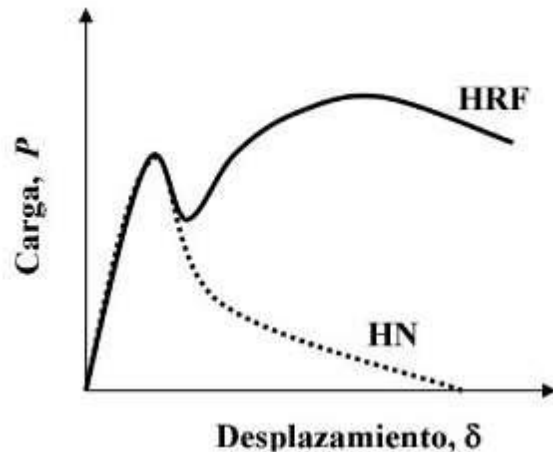


Figura 2.2.: Comparación tipo de carga vs desplazamiento para HRF y HN

El incremento de la resistencia a la fatiga, resistencia al impacto y reducción de la permeabilidad contribuyen a una mayor duración del hormigón beneficiando a largo plazo los costos asociados por mantenimiento.

El área más relevante para analizar en el estudio de HRF corresponde al periodo post primera fisuración, fuera del rango elástico, esto se logra a través de la mecánica de fractura, ya que estudia la formación de fisuras y está basada en criterios de energía. Los ensayos en la actualidad para caracterizar el HRF y obtener diferentes parámetros para el diseño consisten en realizar mediciones a las fisuras, tales como el ancho y la propagación de éstas junto con las deformaciones que sufre el elemento en el proceso de estudio.

2.2 Criterios para dosificar el HRF.

El árido influye en la dispersión de la fibra y la cohesión (se limita el tamaño máximo de árido preferiblemente rodados y mayor contenido de finos para garantizar compacidad).

El contenido de cemento en los HRF requiere de un % de pasta de cemento de mayor volumen que un hormigón tradicional HN.

La relación agua/cemento influye en la porosidad de la mezcla (resistencia y durabilidad).

El uso de aditivos reductores de agua (superplastificantes) contribuye a compensar la pérdida de trabajabilidad del hormigón.

El uso de adiciones (puzolanas naturales, cenizas volantes y humo de sílice) mejoran la impermeabilidad y la cohesión del hormigón.

Contenido de fibras: La eficiencia varía en función de la cuantía. Estas se pueden añadir junto con los áridos o al final del proceso de mezclado.

2.3 Acciones y coeficientes de seguridad.

Como valores característicos de las acciones permanentes, tenemos que la densidad y la adición de fibras en dosificaciones usuales no llegan a modificar el peso específico del hormigón respecto al valor que tiene el hormigón tradicional sin fibras.

Si nos referimos al análisis estructural de este tipo de hormigones debemos decir que el comportamiento no lineal se ve modificado en presencia de fibras, especialmente aquellas que trabajan a tracción y que impiden la abertura y propagación de fisuras, de tal manera que la aplicación de un análisis no lineal es recomendable para casos en los que las fibras sean una parte importante del refuerzo del hormigón.

2.4 Clasificación general de las fibras.

Las principales características geométricas de las fibras son tres: Longitud, Diámetro equivalente y Esbeltez y cada una de estas se determina con lo indicado en las normas EN-14651 y ASTM C-1609. Sin embargo, podemos clasificarlas en función de su naturaleza en tres grandes grupos: Fibras de Acero, Fibras Poliméricas y Fibras inorgánicas. En cuanto a fibras inorgánicas se refiere a las fibras de Vidrio; sin embargo, en este proyecto de investigación solo estudiaremos las fibras de Poliméricas o sintéticas, específicamente las del tipo EPC Barchip-54. (*Manuel Figueroa Andrade, Comparativa de la tenacidad entre hormigón convencional y HRF, 2013*)

2.5 Fibras poliméricas o sintéticas.

En el presente proyecto utilizaremos fibras del tipo sintéticas (ver Figura 2.3) para la confección de probetas de hormigón tipo Vigas según las normativas EN-14651 y ASTM C-1609, por ende, se procederá a realizar una breve reseña de su descripción y clasificación

Como su nombre lo dice las Fibras sintéticas, son aquellas formadas por un material polimérico como pueden ser polipropileno, polipropileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster, etc. Estas se pueden adicionar homogéneamente al hormigón y se clasifican por su proceso de fabricación en dos Tipos:

- Monofilamentos extruidos
- Láminas fibriladas

Debido a que tienen dimensiones variables también se clasifican en función de su diámetro en:

- Micro-fibras < 0.30 [mm] de diámetro.
- Macro-fibras \geq 0.30 [mm] de diámetro.

Las Micro-fibras no tienen ninguna función estructural, su uso se enfoca para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, principalmente en pavimentos, y a mejorar

su comportamiento frente al fuego añadiendo una dosificación alta de fibras por kg/m^3 . De acuerdo con la ACI la dosificación típica para Micro-fibras con la que se comenzó a trabajar, fue de 0.1 a 0.3 por ciento en volumen, aproximadamente una quinta parte de lo que se había usado anteriormente para fibras más gruesas, de tal manera que podemos considerar una dosificación alta para Micro-fibras aquella que se encuentre por encima del 0.3% en volumen. Al poder medir la dosificación de Micro-fibras en kg/m^3 , el hormigón se puede identificar por su frecuencia de fibra, la cual indica el número de fibras presentes en 1 [kg], dicha frecuencia de fibra depende de la longitud de fibra y especialmente de su diámetro.

Las Macro-fibras pueden colaborar estructuralmente y su longitud varía de 20 [mm] a 60 [mm], la cual debe guardar una relación de 3:1 con respecto al tamaño máximo del árido. (Manuel Figueroa Andrade, *Comparativa de la tenacidad entre hormigón convencional y HRF*, 2013)

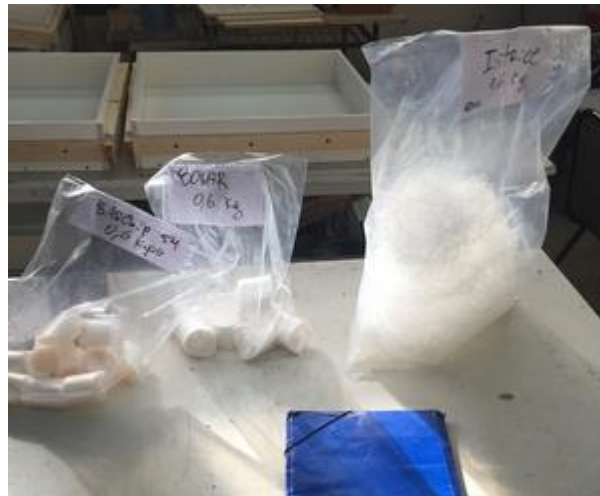


Figura 2.3.: Diversos tipos de fibras poliméricas.

A pesar de las características positivas que entregan las fibras al hormigón como refuerzo, es importante aclarar, que como todo producto tiene sus falencias. Es posible que aparezcan algunas fibras en la superficie de hormigón lo que impediría el normal enraizado de la amasada. En algunos casos en donde la cantidad de fibra añadida a la mezcla es muy considerable, es posible que se generen distintas aglomeraciones del material, esto es muy ocurrente cuando la mezcla no es del todo fluida por tanto la dosificación del hormigón debe ser previamente estudiada para evitar este tipo de problemas.

2.6 Aplicaciones varias de los HRF.

2.6.1 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 “secar” hormigón 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.

El uso de las microfibras no exime al constructor de curar el hormigón (su costo por metro cuadrado puede ser similar), pero se constituye en un factor de seguridad adicional muy apreciado en la construcción.

Las macrofibras en pisos y pavimentos reemplazan la malla electrosoldada que es colocada en el centro del espesor, destinada a absorber los esfuerzos de temperatura y retracción en dichos elementos.

Las mallas electrosoldadas se han usado para resolver los esfuerzos secundarios en pisos y pavimentos. Sin embargo, su almacenamiento, transporte y colocación ha sido una fuente de dificultades en las obras, por no mencionar la inversión en mano de obra y tiempo. Justamente para resolver estos inconvenientes las macrofibras logran reemplazar el efecto de la malla.

Las macrofibras en pisos y pavimentos previenen la aparición de fisuras a larga edad (en estado endurecido), si la fisuración tiene lugar impiden el incremento en el ancho de la misma, pero más importante aún permiten que la estructura continúe en servicio al aumentar su tenacidad. Este hecho multiplica la vida útil de la estructura. *(Ana Blanco, Avances en Tecnologías del Hormigón, Diciembre 2015)*



Figura 2.4.: Aplicación de fibra en pavimentos portuarios (Aplicaciones del HRF, Ana Blanco 2015).

2.6.2 Prefabricados

Para elementos prefabricados cuyas dimensiones y espesores están optimizados, las fibras han sido desde varias décadas un elemento común.

La colocación de estos elementos hace que sean susceptibles a agrietamientos y descascaramientos, en estos casos las fibras resultan muy útiles debido a que el agrietamiento de los elementos se reduce y si ocurre, le permiten al material continuar funcionando sin desecharlo. En el caso particular de elementos ligeros de baja densidad las fibras se han usado históricamente para disminuir su fisuración en estado fresco, pero también para mejorar el monolitismo del material y hacerlo menos “frágil”, es decir para aumentar su capacidad de deformación, hacerlo más “dúctil” antes de que se produzca la falla.

Las aplicaciones de fibras en tuberías, vigas y prelosas son un hecho cotidiano puesto que, le permiten a dichos elementos eliminar o convivir con la fisuración. Las fibras de asbesto empleadas en la fabricación de elementos tan esbeltos como tejas o láminas, se usaron durante muchos años hasta que surgieron inquietudes acerca de consideraciones de salud por la presencia de este material. Hoy en día las fibras de polipropileno, nylon, polietileno, metal etc, se emplean con fines similares en la producción de prefabricados. Tanto en la prefabricación pesada (pilotes, postes, dovelas, vigas) como en la prefabricación liviana (ladrillos, láminas, etc).

Elementos de prefabricación pesada como dovelas para túneles hechos con TBM, han incorporado macrofibras para reemplazar parte del acero secundario, aumentando los volúmenes de producción.



Figura 2.5.: Materiales prefabricados con HRF (Fuente “Hormigón reforzado con fibra”, publicado por Sika).

2.6.3 Shotcrete.

Al igual que en pisos y pavimentos, en el shotcrete las fibras sustituyen la malla electrosoldada, 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 cuadrado 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 hormigón lanzado debido a que pueden controlarse estrictamente los espesores del hormigón colocado (Ver Figura 2.6). La condición de seguir estrictamente el perfil de la excavación sin preocuparse por el cubrir la malla, no sólo se convierte en un ahorro evidente de material, sino al mismo tiempo en un ahorro de tiempo. 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.

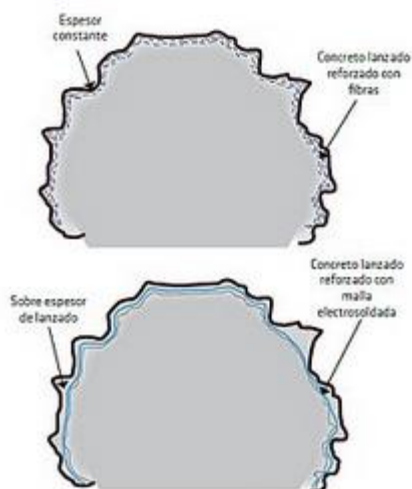


Figura 2.6.: "Hormigón reforzado con fibra", publicación Sika 2012.

En aplicaciones hidráulicas las fibras sintéticas han logrado una acogida importante debido a que no se oxidan ni generan residuos de óxido que en algunas ocasiones manchan la superficie del hormigón.

Particularmente en aplicaciones tuneleras, las fibras de polipropileno, han demostrado una ventaja adicional que va más allá del comportamiento mecánico del material, la resistencia al fuego.

Las fibras, específicamente de polipropileno, en dosificaciones de 1 kg/m^3 de hormigón han demostrado una disminución o eliminación del descascaramiento explosivo de la superficie del hormigón, debido a que a una temperatura de $160 \text{ }^\circ\text{C}$ el material se funde y permite al vapor atrapado al interior del material salir al exterior eliminando o disminuyendo las presiones que genera este vapor al interior del material.

2.6.4 Hormigones resistentes a explosiones.

Un elemento de hormigón al recibir este tipo de cargas explosivas (dinámicas y cíclicas) podría evitar colapsar apelando a su capacidad de resistencia mecánica como a su capacidad de deformación. Ambas respuestas, generan esfuerzos internos y deformaciones, absorben la energía (carga x distancia / tiempo) de esta súbita carga hasta sus límites. Un hormigón reforzado de la manera tradicional cederá fácilmente el recubrimiento y aún más material dependiendo de la magnitud de la explosión. Esto se debe justamente a que la capacidad de deformación del hormigón en general es muy limitada. En cambio, un HRF permite al material llegar a su máxima resistencia a la tensión, fallar y seguir funcionando, deformándose después de la fisuración para que el elemento no colapse.

Una vez más se aprovecha el incremento en la tenacidad del material para mejorar la resistencia del mismo en la fase postfisuración. Las estructuras que pueden ser sometidas a ataques externos, tanto de explosiones como de proyectiles suelen incorporar fibras en su amasada mejorando así la resistencia al impacto. En la figura 2.7 se expone la relación Carga vs. Deflexión de una viga sometida a diversos impactos con diferentes velocidades. Las fibras son un refuerzo tridimensional cuya repartición es aleatoria y le permiten a la carga atacar la estructura en cualquier dirección sin que tenga que estar direccionado en un plano como lo es el uso del refuerzo tradicional.

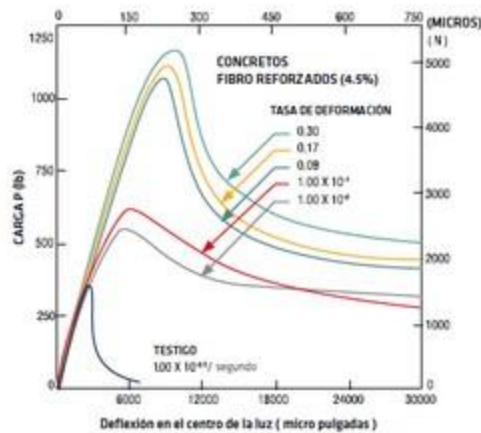


Figura 2.7.: Relación Carga vs. Deflexión de una viga sometida a impacto (a diferentes velocidades)

2.7 HRF y su resistencia a la Flexotracción

De los diversos ensayos existentes, para determinar las propiedades de materiales frágiles, el de tracción directa es considerado el más adecuado. Pese a esto es un ensayo muy complejo el cual arroja una alta dispersión de resultados, por ende, es difícil obtener resultados rigurosos en cuanto al comportamiento de los HRF ya que el coeficiente de variación de los resultados arrojados es bastante amplio. Esta deficiencia se puede atribuir a diversas causas como por ejemplo irregularidades en la confección de las probetas, incorrecta aplicación de las cargas durante el ensayo, mal afianzamiento de la probeta o incapacidad de dar estabilidad al ensayo durante su proceso.

Básicamente las distintas configuraciones de ensayos de carga a este tipo de hormigones se clasifican en ensayos de tracción uniaxial, de tracción directa y ensayos de flexo tracción, siendo este último el ensayo más utilizado gracias a su mayor facilidad de manejo en laboratorio.

Generalmente se puede determinar la tenacidad de los HRF según el área bajo la curva de Carga vs. Deflexión, esto se obtiene de ensayos con probetas prismáticas las cuales son sometidas a una carga puntual en el centro de la luz como lo indica la norma EN-14651. También la probeta prismática puede ser sometida a dos cargas ubicadas en los tercios de la luz de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C-1609. Es recomendable que para la determinación correcta de la tenacidad en los HRF a través del ensayo con carga a los tercios debe regirse por la relación largo altura mayor a 5 y para el caso de probetas con entalles sometidas a flexión con carga en el centro se debe utilizar el CMOD como variable a controlar.



Figura 2.8.: Probeta prismática según ensayo ASTM C-1609.



Figura 2.9.: Probeta prismática según ensayo EN-14651.

Es de vital importancia reconocer la respuesta de los HRF luego de la aparición de la primera fisura o del post agrietamiento, ya que según esto se puede visualizar realmente la importancia de las fibras incorporadas a la mezcla. Para ello existen dos modelos básicos aplicables de reconocimiento los cuales se basan en la relación Tensión vs Deformación y la relación Tensión vs Apertura de fisura (CMOD). (CCHRF, 2014).

Características geométricas y parámetros particulares de caracterización de algunos ensayos varios se indican en la *Tabla 2.1.*


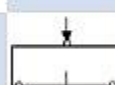

Ensayo	Configuración	Dimensiones Probeta (mm × mm × mm)	Peso probeta (kg)	Superficie de fractura (m ²)	Parámetros para caracterizar HRF	C.V. (%)
ASTM C – 1018		100 × 100 × 350	8,4	0,01	Resistencia a primera fisura	15
ASTM C – 1609					Índices tenacidad	
NBN 15 – 238					Cargas residuales	
EFNARC – Viga		125 × 75 × 550	12,4	0,0094	Tenacidad	20
RILEM 162 - TDF					Energía absorbida	
					Resistencia flexión equivalente	
					Tasa de deformación	
EN - 14651		150 × 150 × 550	29,7	0,0188	Curva carga-deformación	20 – 30
Doble punzonamiento					Resistencia a flexión	
Doble punzonamiento					Límite proporcionalidad	
					Resistencias residuales	
					Resistencia a tracción	
					Resistencia a tracción	13
				Absorción de energía		
				Tenacidad		

Tabla 2.1.: Características de algunos ensayos utilizados para HRF. (CCHRF 2014).

2.8 Ensayo a la flexotracción según la norma EN-14651.

La norma europea define como título del ensayo “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)”. Para fines de esta investigación el ensayo se realizará con probetas de hormigón reforzadas con fibra plástica considerando que en general sus características y propiedades son similares.

Esta norma plantea un método de ensayo el cual busca determinar la resistencia a la tracción por flexión del hormigón, permitiendo a su vez determinar el límite de proporcionalidad LOP y la Resistencia Residual a la Tracción por flexión. Este método es aplicable tanto para fibras metálicas y plásticas e inclusive la combinación de ambas.

Principio: El comportamiento a tracción del hormigón con fibras metálicas se evalúa en términos de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión determinados a partir de la curva carga-desplazamiento del borde de la fisura o de la curva carga-flecha, obtenida aplicando una carga puntual centrada sobre un prisma con entalla simplemente apoyado (Norma Española UNE-EN 14651:2007+A1).

La característica de este ensayo es la utilización de vigas entalladas, esto ayuda a evitar la mayoría de los problemas que ocurren al determinar la respuesta post-peak de carga.

Es importante resaltar que el uso de las entallas debe tener mucho cuidado debido a las concentraciones de tensiones en esta.

Para la realización de este ensayo es necesario el uso de 2 rodillos de apoyo a la vigueta y un rodillo de carga en la parte superior central de esta. Ver Figura 2.10.

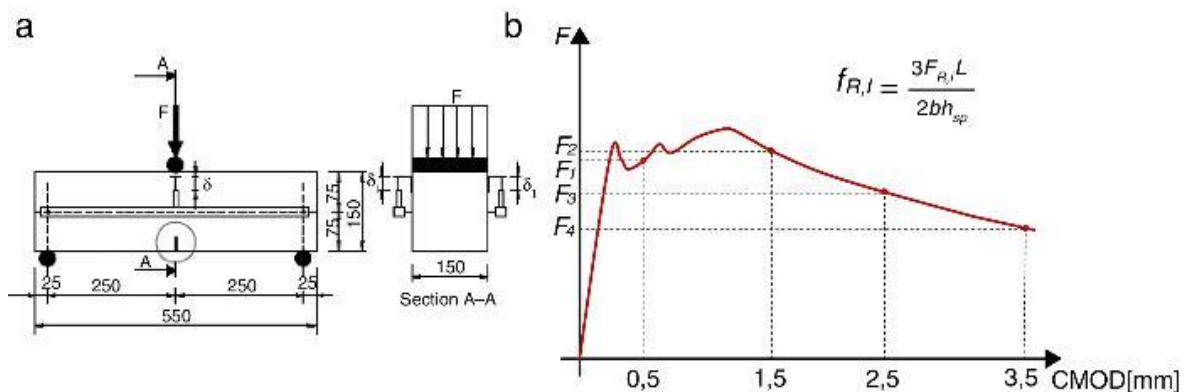


Figura 2.10.: Esquema de configuración del ensayo bajo normativa europea. (Norma EN-14651).

Las viguetas confeccionadas y ensayadas bajo esta normativa tienen una longitud de 600 [mm], siendo su alto y ancho de 150 [mm] respectivamente, además presentan un entalle central (ver Figura 2.11.) de profundidad de 25 [mm] y un espesor de 3 [mm].

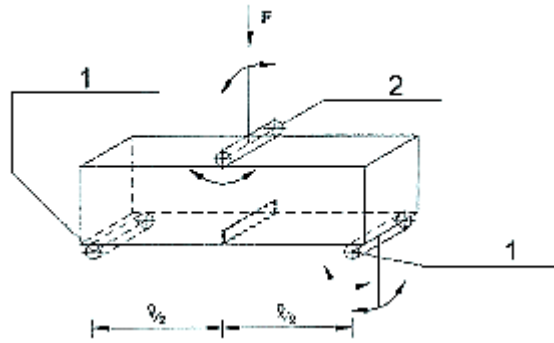


Figura 2.11.: Configuración del entalle y carga sobre la probeta (Norma EN-14651).

La forma y el tamaño de las probetas son ideales para un hormigón que contenga áridos de un tamaño máximo cercano a los 32 [mm]. Y fibras de un largo máximo de 60 [mm].

En la zona de entalla se coloca un transductor para la medición de desplazamiento de la grieta, este se engancha a un bastidor fijado a la probeta, a una distancia de 50 [mm] del centro de la probeta que corresponde a la entalla de la misma, al otro lado del corte y a una distancia de 30 [mm] se fija un perfil ángulo delgado de aluminio el cual sirve para la medición de la flecha.

La ventaja de este método es que es simple y que el control del desplazamiento del borde de la fisura o CMOD asegura una propagación o crecimiento estable de grieta. Las curvas cargas-CMOD o carga-deflexión pueden ser utilizadas para calcular las relaciones tensión-deformación o tensión-ancho de la fisura. Una de las maneras es utilizando la resistencia residual a flexo tracción para una determinada deflexión o desplazamiento del borde de la fisura.

La función del transductor instalado bajo la zona del entalle (ver Figura 2.12) es poder medir el CMOD, este mide las cargas aplicadas en el ensayo a la viga que se va agrietando hasta llegar a un máximo de 4 [mm]. El transductor está directamente conectado al equipo de ensayo que a su vez envía todos los datos para ser registrados hacia un computador para ser interpretados a través del programa "MCC8 Multitest". Este programa nos permite controlar todos los parámetros necesarios para un correcto manejo del proceso del ensayo y sus parámetros de mediciones.

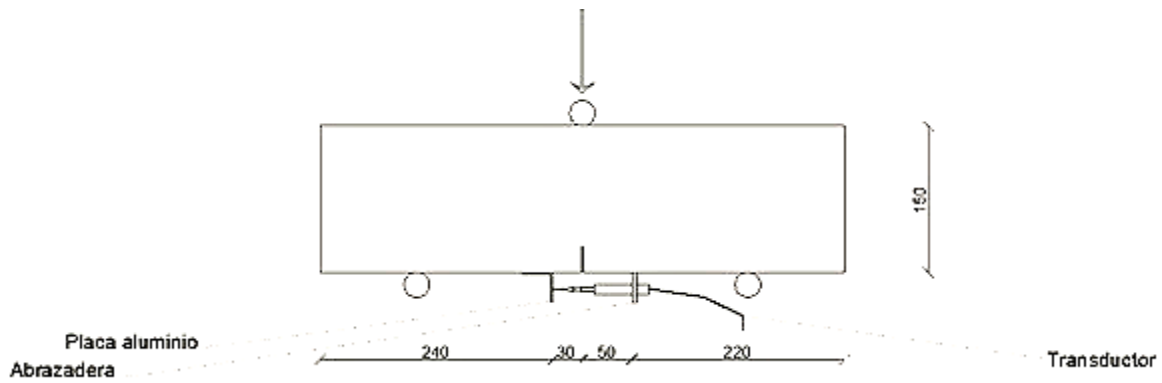
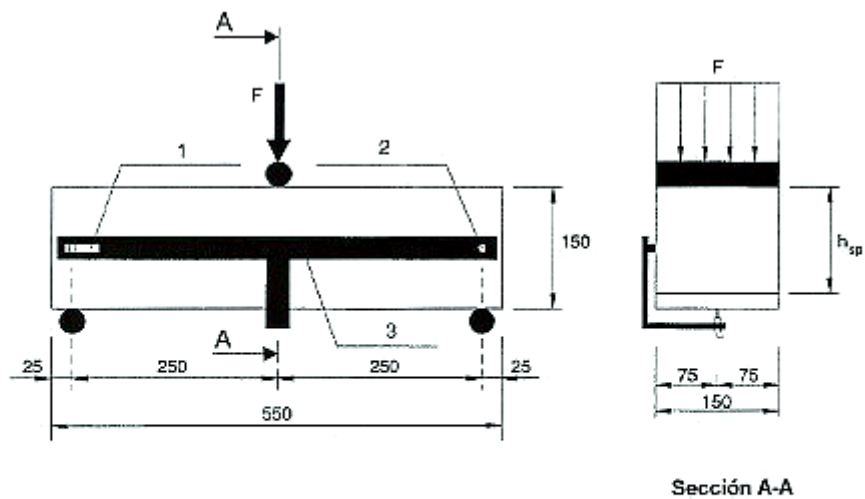


Figura 2.12.: Detalle de Instalación de transductor, placa de aluminio y bastidor (Norma EN-14651)

Antes de la realización del ensayo a flexión y con ayuda de una regla, debe confirmarse la longitud media del vano realizando dos mediciones de la distancia entre los ejes de los dos rodillos de apoyo a ambos lados de la probeta. (Ver figura 2.13.)



Leyenda

- 1 Dispositivo de fijación deslizante
- 2 Dispositivo de fijación rotativo
- 3 Bastidor rígido

Figura 2.13.: Detalle de medición del vano de la probeta (EN-14651)

2.8.1 Expresión de los resultados.

Una de las ventajas de este ensayo propuesto en la norma es que es simple y que el control del desplazamiento del CMOD asegura una propagación o crecimiento estable de la grieta.

El valor de CMOD debe calcularse de la siguiente manera:

$$\text{CMOD} = \text{CMOD}_y \times \frac{h}{h+y} \quad (2.1)$$

En donde:

CMOD: Desplazamiento al borde de la fisura.

CMOD_y: Desplazamiento en el eje de posición del transductor.

h: Altura total de la probeta.

y: Distancia entre la parte inferior de la probeta y el eje del transductor.

Las curvas cargas-CMOD o carga-deflexión pueden ser utilizadas para calcular las relaciones tensión-deformación o tensión-ancho de la fisura. Una de las maneras es utilizando la resistencia residual a flexo tracción para una determinada deflexión o desplazamiento del borde de la fisura.

A partir de valores de carga correspondientes al límite de proporcionalidad (LOP) y a las aberturas de la fisura: 0.5 mm y 2.5 mm (F_1 y F_3 respectivamente), se obtiene el valor de resistencia a flexo tracción y los valores de resistencia residual a flexo tracción correspondientes FR_1 y FR_3 .

El límite de proporcionalidad se calcula de la siguiente manera:

$$f_{ctL}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.2)$$

En Donde:

f_{ctL}^f = resistencia de primera fisura MPa.

L = distancia entre apoyos mm.

b = ancho de la probeta mm.

h_{sp} = distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en la sección de centro de vano mm.

F_L = carga de primera fisura, definida como el mayor valor de carga en el intervalo de CMOD de 0 a 0.05 mm. Ver figura 2.14.

El valor de la carga F_L debe determinarse trazando una línea paralela al eje de la carga del diagrama carga-CMOD a una distancia de 0,05 [mm], y considerando F_L como el mayor valor de la carga en el intervalo de 0,05 [mm]. Ver figura 2.14 (norma EN-14651)

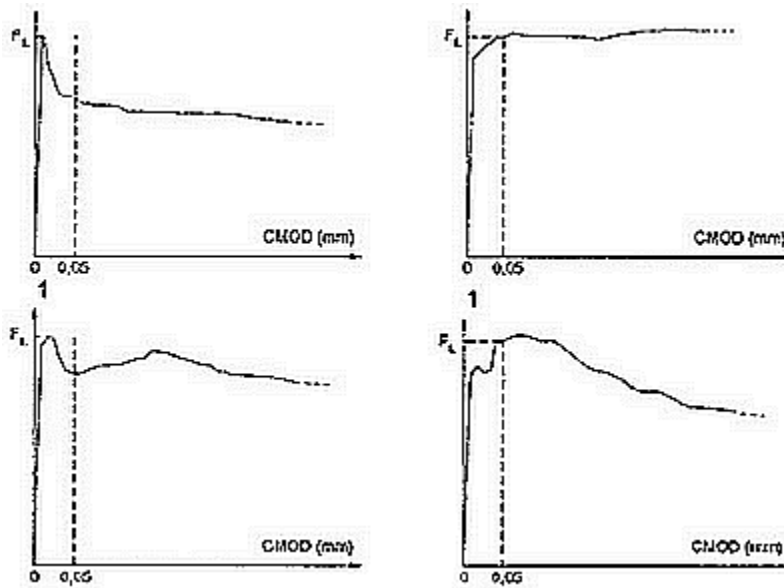


Figura 2.14.: Diagramas de carga-CMOD y FI (EN_14651)

En la imagen anterior se muestran algunas configuraciones de gráficos carga v/s CMOD los cuales son utilizados para posteriormente calcular la resistencia residual.

Dentro del análisis de resultados también son importantes las resistencias residuales de la probeta de HRF, estas se obtienen para cada valor de CMOD y se calculan con la siguiente expresión:

$$f_{R,j} = \frac{3 F_j L}{2 b h^2 s_p} \quad (2.3)$$

En donde:

$f_{R,j}$: Resistencia residual a la tracción por flexión en MPa.

F_j : Carga correspondiente a CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, con j (1,2,3,4) en Newtons.
(Ver figura 2.15.)

L : Longitud del vano en milímetros.

b : Anchura de la probeta en milímetros.

h_{sp}^2 : Distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en milímetros.

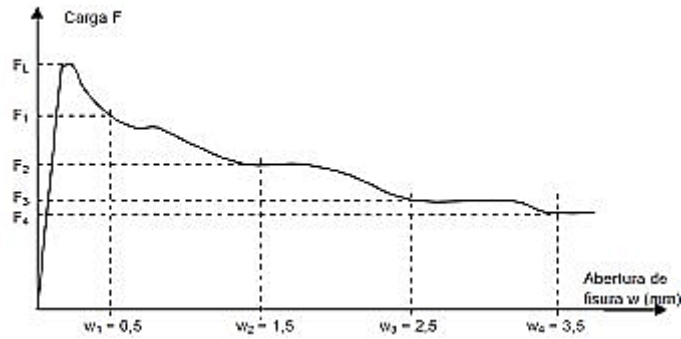


Figura 2.15.: Curva carga v/s CMOD, indicando CMOD1,2,3,4 (EN-14651).

En la Figura 2.15. se muestra un gráfico tipo de una probeta sometida a una carga, con sus respectivas resistencias residuales correspondientes a 4 aperturas de fisura o CMOD.

2.9 Ensayo a la flexotracción según la norma ASTM C-1609.

Esta norma plantea un método de ensayo el cual busca determinar la resistencia a la tracción por flexión del hormigón usando parámetros obtenidos de la curva carga vs deflexión. Este método es aplicable tanto para fibras metálicas y plásticas e inclusive la combinación de ambas.

Principio: Este método de prueba evalúa el desempeño a la flexotracción del hormigón reforzado con fibra utilizando parámetros derivados de la curva carga-deflexión obtenida aplicando una carga en el tercio central sobre un prisma simplemente apoyado a través de un sistema de carga controlada. (Norma Internacional ASTM C1609/C1609m – 12).

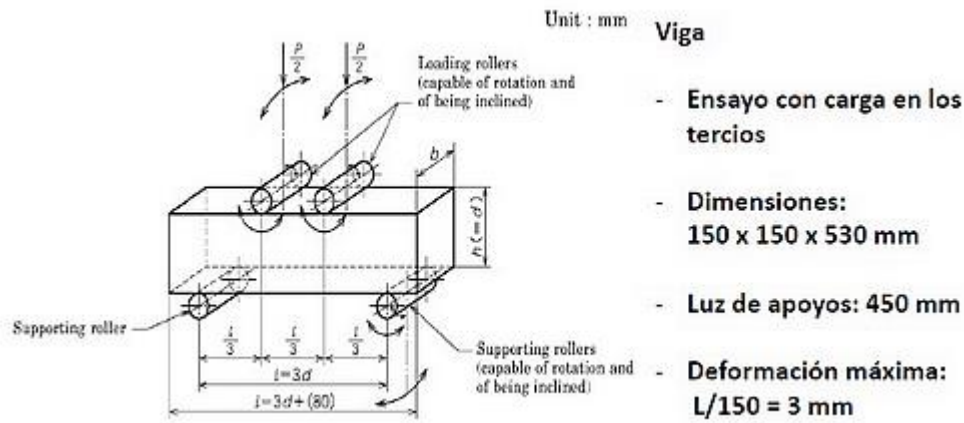


Figura 2.16.: Esquema general del ensayo ASTM C-1609

El ensayo de flexión se realiza generalmente en vigas de dimensiones de 150 x 150 x 530 [mm]. La norma americana ASTM C1609 describe el procedimiento de ensayo a flexión. La prueba evalúa el comportamiento a flexión de concreto, usando parámetros derivados de la curva carga-flecha obtenida para carga a los tercios usando un equipo servohidráulico de lazo cerrado. Mediante la prueba, se determina la resistencia máxima calculada en el primer peak de la curva y las resistencias residuales y tenacidad en las flechas especificadas en la norma. La figura 2.17 muestra el esquema del dispositivo de carga ASTM C78 y la expresión adjunta se emplea para calcular la resistencia máxima f_{ct} donde, P es la carga máxima de rotura, l es la longitud del claro entre apoyos, b es el ancho de la viga, y d es la altura de la viga. La figura 2.18 muestra el diagrama carga - flecha típica de un ensayo a flexión en vigas.

Nota: La tenacidad expresada en términos del área bajo la curva carga vs deflexión indica la capacidad de absorción de energía de la muestra a ensayar, y su magnitud depende directamente de la geometría de la muestra y la configuración de la carga. (Norma Internacional ASTM C1609/C1609m – 12).

Para la realización de este ensayo con carga en los tercios es necesario el uso de 2 rodillos de apoyo simple a la viga y 2 rodillos de carga capaces de rotar en su propio eje. Ver figura 2.17. La carga y deflexión son controlados y grabados hasta una deflexión final de $L/150$.

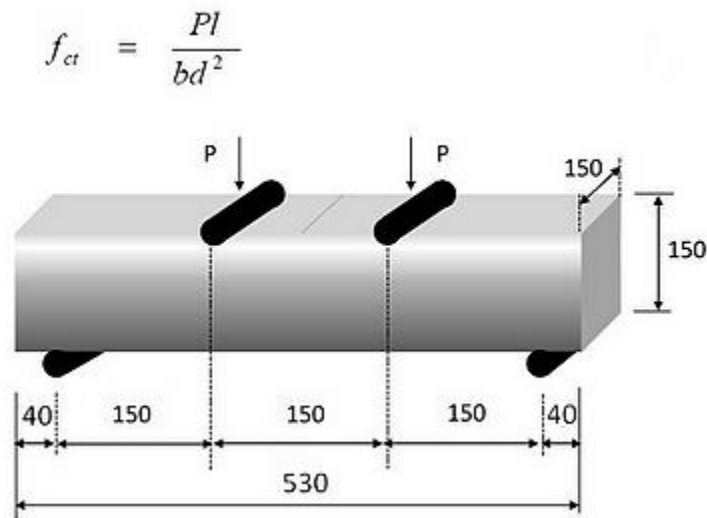


Figura 2.17.: Esquema de configuración del ensayo ASTM C-1609

Las viguetas confeccionadas y ensayadas bajo esta normativa tienen una longitud de 530 [mm], siendo su alto y ancho de 150 [mm] respectivamente, la luz de apoyos es de 450 [mm]. Para el caso de HRF las probetas serán cargadas por la misma cara en que se descargó el hormigón con fibras.

Si el contacto entre los rodillos y la probeta no se puede asegurar en su totalidad es necesario raspar la superficie de contacto de la muestra hasta conseguir el contacto completo entre las superficies

La elección de los parámetros del ensayo depende de la aplicación final que se le quiera dar al hormigón estudiado, el nivel de agrietamiento aceptable y la capacidad de deflexión que se quiera alcanzar. El comportamiento del hormigón reforzado con fibra sintética se ve influenciado directamente por la cantidad y el tipo de fibra incorporada. Las fibras pueden aumentar la capacidad de resistencia residual y tenacidad post fisuración.

La máquina de ensayo debe ser capaz de operar servo-controlada en donde la deformación neta del centro de la viga se utiliza como criterio para controlar la velocidad del aumento de la deflexión.

A partir de este ensayo, se puede estimar la capacidad de deformación que la fibra le proporciona al hormigón, después de alcanzar la resistencia máxima a flexión. En la figura 2.17 se presenta el comportamiento característico del hormigón a flexión. La última lectura de deformación que se muestra en la figura no está asociada a la capacidad última de deformación, ya que el valor de este parámetro se establece explícitamente en la norma ASTM C-1609 (2010) como $L/150$ de la longitud del claro de la probeta (l_c). La carga de primer peak se emplea para calcular la resistencia a flexión (módulo de rotura, MR) para

valorar la capacidad post peak se calculan dos resistencias residuales $f_D 600$ y $f_D 150$ para flechas iguales a $L/600$ y $L/150$, en donde L en este caso es 450 [mm]. Ver Figura 2.18.

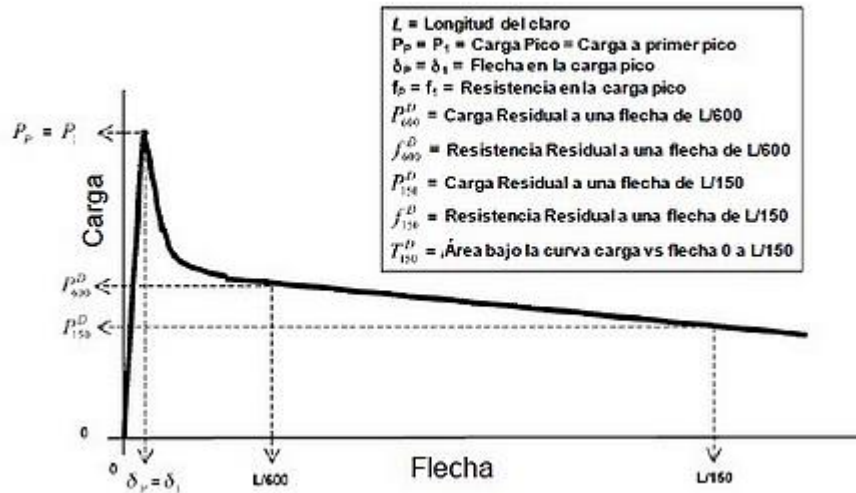


Figura 2.18.: curva carga vs flecha para determinar los parámetros de carga residual

La deflexión en el primer peak se calcula a través de la siguiente formula:

$$\delta_1 = \frac{23P_1L^3}{1296EI} \left[1 + \frac{216d^2(1+\mu)}{115L^2} \right] \quad (2.4)$$

En donde:

δ_1 = La primera deflexión máxima [mm].

P_1 = La carga del primer pico [N].

L = La longitud del tramo [mm].

E = El módulo de estimación de la elasticidad del hormigón [MPa].

I = El momento de la sección transversal de la inercia [mm].

D = La profundidad media de la muestra a la fractura, como orientado para pruebas [mm].

μ = Coeficiente de Poisson = 1.25 según norma.

2.9.1 Expresión de los resultados.

Todos los valores para el análisis de este ensayo se obtienen de la curva carga vs deflexión.

Se debe determinar la carga en el primer peak (f1) como el valor de carga correspondiente al primer punto en la curva carga vs deflexión donde la pendiente es 0, es decir el valor de carga máxima local. Para calcular el valor de Resistencia Residual utilizamos la siguiente formula:

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.5)$$

En donde:

f = la fuerza [MPa].

P = la carga [N].

L = la longitud del tramo [mm].

B = la anchura media de la muestra a la fractura [mm].

d = la profundidad media de la muestra [mm].

Nota: El resultado se debe registrar redondeando al 0,05 MPa.

El valor de carga máxima (fP) se determina como el punto de la curva carga vs deflexión correspondiente al mayor valor de carga aplicado justo antes de alcanzar la deflexión del punto final.

En el cálculo de la resistencia peak utilizamos el valor de carga máxima obtenido utilizando el valor redondeado al 0,05 [MPa] más cercano.

Para determinar los valores de cargas residuales PD₆₀₀ y PD₁₅₀ de la muestra de HRF se deben considerar los valores de deflexión en los puntos L/600 y L/150 de la luz del canto. Las resistencias residuales Fd₆₀₀ Y Fd₁₅₀ se calculan utilizando las cargas residuales redondeando al 0,05 [MPa] más cercano.

El área total bajo la curva carga vs deflexión hasta una deflexión de L/150 representa la Tenacidad TD₁₅₀ alcanzada por la probeta de HRF ensayada.

Para calcular la resistencia residual a la flexión equivalente RDT mediante la siguiente formula:

$$R_{T, 150}^D = \frac{150 \cdot T_{150}^D}{f_1 \cdot b \cdot d^2} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

En donde:

RDT = Resistencia residual a la flexión equivalente.

F₁ = fuerza del primer peak MPa.

TD₁₅₀ = Tenacidad en L/150. Joule.

III - CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Se realiza una campaña experimental de confección de probetas HRF con el fin de obtener datos tangibles que nos ayuden a determinar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras poliméricas a flexo tracción según la normativa de dos ensayos:

El primero bajo la norma europea EN-14651, donde se utilizan prismas con entalla sometidas a una carga central. Y el segundo bajo la norma ASTM C1609, donde se utilizan prismas con carga en los dos tercios del claro.

Tenemos en claro que en la actualidad el ensayo de flexión en vigas prismáticas de Hormigón reforzado se utiliza con mucha frecuencia. La prueba propuesta evalúa el rendimiento a la flexión de los parámetros de resistencia derivada del HRF en términos de área bajo la curva de carga-deflexión. Esta curva nos entrega proporciona datos para la evaluación de la capacidad de absorción de energía de la viga y su magnitud depende directamente de las características geométricas de la misma, así como del sistema de carga que se considere, en nuestro caso y gracias a las herramientas brindadas por el laboratorio LEMCO, utilizaremos probetas prismáticas ensayadas bajo aplicaciones de carga y velocidad regulada.

La prueba de flexión será representada por la relación entre la carga y la apertura de la fisura CMOD de una viga entallada según la EN-14651 o entre la carga y la deflexión, según la norma ASTM C-1609. En el primer caso, la resistencia a la flexión residual se evalúa para valores especificados de la apertura de fisura. En el segundo caso, el área bajo la curva carga-deflexión se calcula para diferentes valores de desplazamientos.

El ensayo a realizarse bajo la norma europea EN 14651 tiene por objetivo la evaluación de la resistencia a la flexión, por medio de la definición de parámetros dimensionales que consideran el comportamiento "post fisuración". En el cual la viga simplemente apoyada será sometida a una carga central "F" variable en el tiempo en función de la apertura CMOD medida instantáneamente por el transductor de deformación instalado en la probeta. (*Ver Figura 3.1 asociada al desarrollo del ensayo.*)

Las dimensiones de las vigas confeccionadas son: 150 x 150 x 600 mm. con una entalla de 25 mm. Las ventajas que entrega este método radican en su simplicidad al tiempo que se controla, a través del desplazamiento de apertura en los bordes de la fisura (CMOD), lo cual sin duda alguna asegura una propagación estable de la fisuración. De acuerdo a lo anterior, las curvas que relacionan la carga con el CMOD, así como la que relaciona la carga con la deflexión serán usadas para calcular las relaciones entre esfuerzos y deformaciones, o entre los esfuerzos y el ancho de la fisura para poder evaluar el efecto de la incorporación de las fibras en la mezcla de Hormigón.



Figura 3.1.: Transductor de deformación instalado en la parte inferior de la probeta.

El ensayo a realizarse bajo la Norma ASTM C-1609 propone un método sobre vigas a flexión con cargas en los dos tercios de la luz, en este caso la probeta de ensaye mide 150 x 150 x 530 [mm]. (En la Figura 3.2 se muestra un desarrollo de este ensayo).

En la probeta confeccionada para este ensayo la longitud de la luz libre entre los apoyos (L) es de 450 [mm]. Cabe destacar que, en general, durante el ensayo su propósito es medir la deflexión al centro de la viga, y se grafica la curva carga-desplazamiento. Se determinan las cargas de post-fisuración para niveles de deflexiones preestablecidos, en $L/600$ y $L/150$ (" L " es la longitud de luz libre entre los apoyos), que luego son convertidas a resistencias residuales, por medio de un análisis elástico convencional. De acuerdo a lo anterior, la tenacidad se determina como el área limitada en la curva carga-desplazamiento, por la abscisa de la deflexión asociada al valor de $L/150$.



Figura 3.2.: Probeta de ensaye con cargas en los dos tercios de la luz.

Cabe destacar que esta investigación se limita a la obtención de datos para el caso de hormigones reforzados con fibras de polietileno en una dosificación intermedia de 8 [kg/m³] de hormigón.

A cada una de las probetas de hormigón se le determinaran sus propiedades mecánicas, siguiendo los procedimientos antes mencionados de ensayos normalizados.

Todas y cada una de las probetas son confeccionadas bajo las mismas condiciones, esto quiere decir que para cada amasada de hormigón se utilizó el mismo tipo de material, con los mismos agregados, un único tipo de fibra y un único aditivo; todos controlados y supervisados bajo la tutoría del laboratorio de investigación LEMCO de la UTFSM Casa Central.

IV – DATOS EXPERIMENTALES.

4.1 Cemento.

El cemento a utilizar para la confección de las probetas de HRF corresponde a Cemento Polpaico P400. Este cemento se fabrica en la Planta Polpaico bajo la Norma Chilena 148.Of68 “Cemento, Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales”. Según esta norma, el “Polpaico 400” es un “Cemento Portland Puzolánico, Grado Alta Resistencia”

Este cemento es de un riguroso autocontrol de producción, el cemento “Polpaico 400” es muestreado en la Planta Polpaico por IDIEM de la Universidad de Chile; en la *tabla 4.1* se muestra las especificaciones de la norma NCh 148.Of68 y los valores medios de los resultados de dicho control externo.

Tabla 4.1.: Especificaciones cemento Polpaico P400 (Polpaicoconexion).

Cemento Polpaico P 400 y la norma NCh 148. Of68	Características químicas y Físicas	NCh 148. Of68	Cemento Polpaico P 400
	Expansión en autoclave, %	1 máx.	0,06
	Pérdida por calcinación, %	5,0 máx.	4,0
	Residuo insoluble, %	50,0 máx.	15,3
	Contenido de SO ₃ , %	4,0 máx.	2,1
	Peso específico, kg/dm ³	-	2,9
	Tiempos de Fraguado (Vicat)		
	Inicial, minutos	45 mín.	130
	Final, minutos	600 máx.	180
	Finura (Blaine, cm ² /g)	-	4700

En el cuadro anterior se detallan algunas de las principales características de interés del usuario del cemento Polpaico P 400. Es importante para el estudio la característica de resistencia a la flexotracción del cemento ya que es la que se estudiara a fondo en campaña experimental.

El cemento Polpaico P 400 se caracteriza por ser de los más adecuados para trabajar en obras de ambientes agresivos, ósea es ideal para shotcrete en túneles ya que garantiza una alta resistencia y durabilidad a lo largo del tiempo. Además, tiene un buen comportamiento frente a sales y sulfatos, sin dejar de lado que desarrolla bajo calor de hidratación.

Este tipo de cemento también es muy utilizado para obras y procesos de la construcción, tales como construcciones generales en donde se requieren altas resistencias tanto para edificaciones en altura y obras industriales, hormigones prefabricados de alta

resistencia inicial como lo son los pretensados para vigas y puentes, sistemas constructivos con desmolde a corto plazo e ideal para inyecciones de hormigón en rocas, suelos y ductos postensados.

Dentro de los beneficios de la utilización de este tipo de cemento se puede destacar que responde a mayores resistencias a largo y corto plazo en comparación a otros cementos tradicionales, permite optimizar los avances de obras especialmente en etapas de obra gruesa, posee aplicaciones especiales como lechadas de inyecciones y una alta compatibilidad con el uso de aditivos de última generación. (*Ficha 1a, Polpaico Siempre en Obra*)

Cabe destacar que el cemento es el último material en ser adquirido, siendo guardado en un lugar seco y seguro, debido a los efectos negativos que causa la humedad.

4.2 Agregados Pétreos.

Los áridos empleados para la confección de los hormigones son arenas gruesas y gravas de tamaño máximo nominal de 5 y 10 [mm] respectivamente, siendo el elemento que conforma el esqueleto mineral inerte de hormigón. Estos por una parte deben cumplir con las exigencias esenciales de composición, durabilidad, resistencia y limpieza, así como también, los áridos deben tener tamaños, formas y granulometrías de acuerdo a los requerimientos de las normativas estipuladas.

La arena utilizada en esta campaña experimental es arena negra, esta tiene la finalidad de conformar el mortero o pasta de cemento ya que al mezclarse con cemento y agua son el aglomerante de la mezcla de hormigón, además de ser la fase aglomerante la relación de agua/cemento es la que proporciona la resistencia del hormigón.

Por otra parte, la gravilla cumple un rol fundamental en la composición del hormigón otorgando mayor rendimiento a la mezcla, la gravilla es utilizada principalmente para disminuir la cantidad de cemento de la dosificación para así economizar el hormigón.

Con respecto al porcentaje de material fino, se recomienda para hormigones reforzados con fibras, la incorporación de mayor cantidad de finos con el fin de reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y favorecer la movilidad de las fibras en la mezcla.

Estos áridos son los principales constituyentes del hormigón y entregan las características que definen el comportamiento del mismo. Para conocer las características de los áridos a utilizar, se realizaron ensayos de acuerdo a las siguientes Normas:

- Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales según Nch 163 of 79.
- Extracción y preparación de las muestras según NCh 164.
- Determinación de la Granulometría de las arenas y las gravas, según NCh 165 Of. 77.

- Determinación de las densidades aparentes, según NCh 1116 Of. 77.18
- Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas, según NCh 1117 Of. 77.
- Determinación de las densidades real y neta, y la absorción de agua de la arena, según NCh 1239 Of. 77.
- Determinación del contenido de materiales finos menores a 0,08 [mm] según NCh 1223 Of. 77.

De acuerdo a los tamaños máximos requeridos de arena y grava para esta investigación, considerando además las dosificaciones propuestas y por último los resultados obtenidos luego de haber realizado los ensayos correctamente, según las normas, bajo las dependencias del laboratorio LEMCO se concluyó que la arena negra cumple con los requisitos de arena y grava solicitados para la campaña experimental, por lo tanto, no es necesario agregar un tipo de grava adicional para la confección del HRF.

En la *Tabla 4.1* se identifican las propiedades características del árido luego de ser estudiado en las dependencias del laboratorio bajo las distintas normativas antes mencionadas:

Tabla 4.1: Propiedades características del agregado.

Ítem	[kg/m ³]
Densidad aparente suelta	1.695,05
Densidad Compactada por percusión	1.908,98
Densidad real árido saturado superficialmente seco	2.518,80
Densidad real árido seco	2.521,50
Densidad Neta	2.638,20
	%
Absorción de agua	2,39
Finos por lavado	6,30

En la *Tabla 4.2* se presentan las bandas granulométricas, obtenidas según el procedimiento descrito en la norma NCh 165 Of. 77. Se recurrirá a la norma NCh 163 en la cual se indican los requisitos generales que deben cumplir los áridos para morteros y hormigones, con el fin de obtener las bandas granulométricas de arenas y gravas.

Tabla 4.2: Granulometría.

Muestra: 491 gr				
Tamiz	Peso Retenido (gr)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
Nº 4	55	11,2	11,2	88,8
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 100	41	8,35	95,72	4,28
< 100	21	4,28	100	0

El agregado escogido para el estudio está dentro de las bandas exigidas por la Norma Chilena 153, por tanto, se espera que con este tipo de material se pueda cumplir con las exigencias para la confección del HRF requerido.

4.3 Aditivo Viscocrete 5100 CL.

Para el caso de los HRF generalmente se recurre a la utilización de aditivos reductores de agua conocidos principalmente como súper fluidificantes y aireantes.

El HRF por contener diversas dosis de fibras agregadas a su composición, en este caso dosis intermedias de 8 kg/m³, la mezcla presenta una reducción considerable de la docilidad y trabajabilidad. Una solución a esta situación es aumentar la dosificación de agua dentro de la amasada, pero esto afectaría directamente la resistencia y durabilidad esperada, para evitar esta problemática se recurre a los beneficios del aditivo Viscocrete 5100 CL.

El Sika Vicocrete 5100 CL es un aditivo de alta capacidad de reducción de agua basado en polímeros sintéticos que permite máxima fluidez, alta cohesión y mantener la trabajabilidad de la mezcla en forma prolongada. Cumple con los requisitos especificados para superplastificantes en las normas SIA 162 (1989) y EN 934-2. Su composición es líquida de color ámbar transparente opaco y su presentación es en tambor de 216 [kg].

Este aditivo permite al hormigón un aumento de la docilidad, produciendo un hormigón de muy alta trabajabilidad, con elevadas resistencias mecánicas iniciales y finales. Esto se obtiene debido a la reducción importante en el agua de amasado requerida por el hormigón sin aditivo. Como reductor permite producir hormigones de alta resistencia al reducir la relación agua/cemento hasta un 30%. (*Sika Viscocrete 5100 CL, Ficha Técnica, Septiembre 2015*)

En cuanto a sus ventajas se caracteriza por ser un poderoso superplastificante, actúa por diferentes mecanismos incluyendo la adsorción superficial y efectos estéricos separando las partículas de cemento. Con su aplicación se obtienen las siguientes propiedades:

- Fuerte comportamiento autocompactante. Por lo mismo, es altamente apropiado para la producción de hormigones auto compactantes sin la necesidad de vibración.
- Excelente mantención de la fluidez a través del tiempo.
- Extremadamente alta reducción de agua (30%), lo que resulta en un hormigón de alta resistencia y densidad.
- Excelente fluidez, lo que resulta en el trabajo reducido al mínimo para la colocación y compactación.
- Incremento del desarrollo de alta resistencia inicial.
- Mejoramiento del comportamiento en fluencia y retracción.
- Reducida velocidad de carbonatación del hormigón.
- No contiene cloruros u otro ingrediente promotor de la corrosión, por lo que se puede usar sin restricciones en hormigones armados y pretensados.

Algunos de los usos frecuentes para este aditivo son:

- Hormigones prefabricados y pretensados.
- Hormigones autocompactantes sin la necesidad de vibración.
- Hormigones con máxima reducción de agua.
- Hormigones de alta resistencia.
- Hormigones con mantención prolongada de la fluidez.
- Hormigones impermeables y de alta durabilidad.
- Hormigones bajos en agua y bombeados.
- Hormigones a la vista sin defectos estéticos.

4.4 Fibra Sintética EPC Barchip 54.

Un específico segmento de la industria de EPC dio como resultado la liberación de fibras que están optimizadas para funcionar en una amplia gama de aplicaciones basadas en la convergencia de los puntos fuertes específicos de hormigón, los requisitos de cohesión y adhesión, métodos de aplicación y los requisitos de absorción de energía post-fisuración.

Las fibras barchip están certificadas bajo la norma CE en virtud de los requisitos de rendimiento de la norma británica B S EN 14889 y la norma ASTM C1116-03 de especificaciones para hormigones reforzados con fibras y hormigones proyectados.

En cuanto a las características generales en el uso de las fibras sintéticas EPC encontramos las siguientes:

- Pueden ser utilizadas para reemplazar la malla de acero soldada y los refuerzos de alambre.
- No dejan un acabado “peluda” en el enrazado del hormigón.
- No afecta negativamente a las técnicas de acabado.
- No están hechos de fibra de vidrio o acero.
- No dañan los equipos de bombeo.
- No reduce el asentamiento del hormigón.

Tabla 4.4.: Propiedades de la fibra sintética EPC (elastoplastic.com/index.php/products)

Base Material	olefina modificada
Longitud	30 mm - 60 mm
Resistencia a la tracción	550 MPa - 640 MPa
Textura de superficie	continuamente en relieve
No. Fibras	33,000 - 59,500
Gravedad específica	0.90 - 0.92
El módulo de Young	7,1 GPa - 10 GPa
Punto de fusión	150 ° C - 170 ° C
Punto de ignición	Superior a 450 ° C

La fibra utilizada en las amasadas durante esta campaña experimental pertenece a la firma de EPC (Elasto plastic concrete), en su variedad Barchip 54. Esta fibra, a diferencia de otras, es ideal para hormigones proyectados, losas delgadas y hormigones prefabricados.

La fibra sintética se añade a la amasada junto con el agua, luego se sigue con el resto de los materiales secos y se mezcla a una alta velocidad por aproximadamente unos 5 minutos.

En cuanto a las ventajas de utilizar este tipo de material destaca la alta tenacidad a la flexión al igual que la del acero, por otro lado, tiene una durabilidad prolongada en el tiempo ya que por ser sintéticas están libres de los efectos de la corrosión a diferencia de las fibras de acero que por otro lado son más pesadas y difíciles de manipular. Reduce notablemente el daño al hormigón provocado por fuego y desgastes en bombas o mangueras de hormigón. (*Paolo Chioma Valenzuela, Gerente Técnico EPC, Septiembre 2012*)

4.5 Dosificación.

La dosificación a utilizar durante esta campaña experimental fue recomendada por el profesor guía *Don Sergio Carmona*, de acuerdo a estudios previos, su vasta experiencia y expectativas de resultados apropiados que pudieran ser de gran avance en el uso de hormigones proyectados como revestimiento para túneles, los cuales deben cumplir con grandes características mecánicas de acuerdo a la exigencia en terreno. A continuación, en la *Tabla 4.7* se muestra la dosificación detallada de cada material por m³ de hormigón.

Tabla 4.7.: Dosificación de materiales por m³.

Material	Dosificación por m ³
Cemento Polpaico P400 [kgs]	450.
Gravilla [kgs]	150.
Arena [kgs]	1550.
Agua [lts]	210.
Aditivo Viscocrete 5100 CL [lts]	4,5.
Fibra Barchip 54 [kgs]	8.

Como se aprecia en la tabla anterior, este hormigón presenta una gran cantidad de arena por sobre la gravilla debido a que la dosificación esta optimizada de acuerdo para la función de hormigón proyectado o shotcrete, la gravilla se encuentra en dosis pequeñas y como se describió anteriormente es de un tamaño máximo nominal de 10 [mm]. El cemento también presenta una alta dosificación ya que se pretende lograr una alta resistencia adecuada a la que se requiere en recubrimientos de terreno bajo constante presión. El agua se encuentra en dosis mínimas con el fin de no afectar la resistencia del hormigón, como suplemento se agrega la dosis moderada de aditivo ya que complementa al agua en la trabajabilidad del hormigón y además le entrega la propiedad de plastificante característica de un buen shotcrete.

A continuación, en la *Tabla 4.8* se presenta la cantidad de cada material de acuerdo a una amasada de 80 [lt] hormigón. Cabe destacar que la capacidad volumétrica máxima de una amasada es de 85 [lt] respecto a la betonera del laboratorio LEMCO. (*ver Figura 4.1*)

Tabla 4.8.: Dosificación de materiales por amasada.

Material	Dosificación por 80 [lt]
Cemento Polpaico P400 [kgs]	38,25.
Gravilla [kgs]	12,75.
Arena [kgs]	131,75.
Agua [lts]	17,08.
Aditivo Viscocrete 5100 CL [lts]	0,383.
Fibra Barchip 54 [kgs]	0,680.



Figura 4.1.: Betonera utilizada para amasadas de HRF.

V - PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO.

El procedimiento completo de esta campaña experimental se desarrolla dentro de las dependencias del LEMCO (Laboratorio de ensaye de materiales de construcción de la UTFSM) específicamente en el laboratorio de hormigones, en estas aulas se cuenta con personal adecuado, equipos, herramientas, normas y softwares de gran calidad junto con un buen y tranquilo ambiente de trabajo.

Según el programa de esta campaña experimental se requieren confeccionar 20 probetas prismáticas según la norma ASTM C-1609 de dimensiones 150x150x530 [mm] y 15 probetas prismáticas según la norma EN-14651 de dimensiones 150x150x600 [mm] para la dosificación de fibra sintética equivalente a 8 [kg/m³].

5.1 Preparación de materiales y herramientas.

El primer paso para comenzar la fabricación de las probetas es la preparación de los moldajes, estos deben ser correctamente limpiados e impregnados de desmoldante para recibir el hormigón. Dentro de las dependencias del laboratorio LEMCO se encuentran disponibles 10 moldes según las dimensiones de la normativa ASTM y solo 5 moldes bajo las dimensiones de la normativa Europea. De acuerdo a esta limitante y según la capacidad máxima de la betonera es que se programaron 7 amasadas distintas con un máximo de 80 [lt] por amasada distribuidas según muestra la *Tabla 5.1*.

Previo al hormigonado de una amasada se deben preparar en tinetas los materiales a utilizar en la mezcla (arena, gravilla, cemento, agua, fibra Barchip-54 y Viscocrete 5100 CL), cada tineta debe ir correctamente dosificada (*según dosificación Tabla 4.8*) para cumplir con la amasada correspondiente. Cabe destacar que se torna imprescindible verificar el correcto funcionamiento de la betonera antes de cada amasada, por otra parte, se debe contar con al menos una carretilla, una pala y un vibrador de hormigón.

El hormigón fue confeccionado utilizando la betonera de eje vertical Matest, bajo los parámetros de medición y procedimientos establecidos según la norma chilena 170 Of 85 "Hormigón – Requisitos Generales" y la norma chilena 1018 of 77 "Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio".

El procedimiento de hormigonado se realizó con la supervisión del profesor encargado del laboratorio LEMCO, siguiendo el siguiente orden de vertido de materiales en la betonera:

- 50% de la cantidad de gravilla y arena según dosificación.
- 50 % cemento según dosificación.
- 85 % de la cantidad de agua según dosificación.
- 50 % restante de cemento según dosificación
- 50% restante de gravilla y arena según dosificación.

- 15% restante de agua.
- 100% fibra plástica Barchip-54.
- 100% aditivo Viscocrete 5100 CL.

Este procedimiento se realiza tomando los cuidados necesarios para asegurar una mezcla homogénea y con la consistencia deseada para tener un hormigón trabajable. Los materiales son medidos y pesados de acuerdo a la dosificación de cada amasada antes de comenzar con el mezclado tal como se aprecia en la *Figura 5.1*. En la *Tabla 5.1* se muestra la distribución de probetas hormigonadas por cada amasada.

Tabla 5.1.: Distribución por cada amasada del HRF.

TIPO AMASADA	MOLDES PROGRAMADOS [mm.]	
AMASADA 1 (8 kg/m ³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530)	2 VIGAS (150X150X600)
AMASADA 2 (8 kg/m ³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530)	2 VIGAS (150X150X600)
AMASADA 3 (8 kg/m ³ FIBRA)	4 VIGAS (150X150X530)	1 VIGA (150X150X600)
AMASADA 4 (8 kg/m ³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530)	2 VIGAS (150X150X600)
HAMASADA 5 (8 kg/m ³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530)	2 VIGAS (150X150X600)
AMASADA 6 (8 kg/m ³ FIBRA)	4 VIGAS (150X150X530)	1 VIGA (150X150X600)
AMASADA 7 (8 kg/m ³ FIBRA)	5 VIGAS (150X150X600)	



Figura 5.1.: preparación de los materiales, previo al mezclado.

5.2 Hormigonado de las probetas.

Una vez teniendo las probetas limpias, con desmoldante, posicionadas y niveladas correctamente para recibir la mezcla se procede al vertido del hormigón, primero desde la betonera a la carretilla y luego desde la carretilla a las probetas.

Para el vertido de la mezcla de hormigón en las probetas el molde se debe llenar hasta el 90% de su altura antes de la compactación, el vertido debe completarse y enrasarse mientras se compacta. La forma de vaciado debe realizarse según las normativas vigentes, donde se indica que lugares del molde se deben llenar paso por paso, tal como lo indica la *Figura 5.2.*

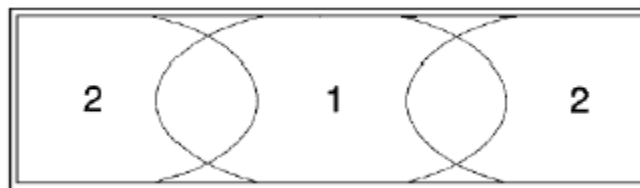


Figura 5.2.: Distribución correcta en el llenado de las probetas.

El siguiente paso corresponde a la compactación del hormigón lo cual se realiza con una sonda vibratora, su forma correcta de realizar es insertando la sonda rápidamente hasta el fondo de la probeta, sin tener contacto con esta y luego retirarla lentamente en forma vertical sin exceso a fin de evitar segregación. Este proceso se realiza en los tres tercios del eje longitudinal comenzando por el centro del molde para luego continuar con ambas orillas. El siguiente paso es el delicado enrasado del hormigón, este se realiza con la precaución de evitar el a flote de fibras a la superficie de la probeta tal como se indica en la *Figura 5.3*.



Figura 5.3.: Probetas de hormigón durante el proceso de llenado, vibrado y enrasado.

5.3 Curado de las probetas.

El procedimiento de curado consiste en el mantenimiento del hormigón en unas condiciones climáticas controladas de temperatura y humedad tales, que el proceso de hidratación del cemento continúe durante el mayor tiempo posible con el fin de que alcance su máxima resistencia y durabilidad, sea más impermeable y se reduzca su riesgo de fisuración. Este proceso se debe realizar adecuadamente tanto en obra como en laboratorio, ya que los resultados de los ensayos en testigos obtenidos en obra y en probetas curadas en laboratorio deben ser los mismos, y no verse afectados por el lugar donde se curaron.

Es imprescindible garantizar un contenido mínimo de humedad con el fin de asegurar el desarrollo de la estructura interna del material. Se han realizado estudios que demuestran que la resistencia final alcanzada disminuye cuando la humedad relativa del hormigón es inferior al 80%. Por ello, el curado debe evitar la evaporación del agua superficial, manteniendo el hormigón en una condición saturada o cercana a ella.

Actualmente hay una gran variedad de métodos para el curado del hormigón, entre los más recurrentes en terreno está el cubrir las estructuras con polietileno o aplicar

pinturas impermeables a la superficie del hormigón. En el caso de laboratorios de ensaye el método más recurrente e idóneo es el dejar las probetas de hormigón en cámaras de curado bajo condiciones de humedad y temperatura totalmente reguladas. Para el curado se recomienda mantener el hormigón a 20 °C de manera constante para mantener la hidratación y no bajar de ninguna forma los 10 °C, manteniendo una humedad relativa mayor o igual a 95%.

En esta campaña experimental el método de curado más recurrente fue el cubrir las probetas con polietileno tal como lo indica la *Figura 5.4*, bajo condiciones óptimas procurando mantener la temperatura y humedad adecuada. La norma UNE-EN 12390-2:2009 dice que una vez hormigonadas las probetas, se mantienen en los moldes al menos 16 horas, pero no más de 3 días, protegidas de impactos, vibraciones y deshidratación.

Una vez cumplido el periodo de curado se procede a desmoldar las probetas teniendo énfasis en realizar esta acción con mucho cuidado para no dañar las viguetas, este proceso va acompañado con la limpieza del moldaje quitando restos de hormigón adheridos y polvo. Finalmente se debe colocar una capa de desmoldante puesto que los moldes serán nuevamente utilizados para las siguientes amasadas de hormigón. Terminado este proceso se acomodan las probetas en un sector libre del laboratorio a la espera de que cumplan los 28 días desde el hormigonado con el propósito de alcanzar la máxima resistencia del HRF.



Figura 5.4.: Probetas cubiertas con polietileno.

5.4 Realización de Ensayos a Flexo Tracción.

Cuando las probetas cumplieron 28 días desde el hormigonado estas ya alcanzan prácticamente su mayor resistencia, luego se extraen de su lugar de acopio e inmediatamente se comienzan a ensayar. La ejecución de los ensayos a flexo tracción están bajo los procedimientos y normativas indicados en la Norma Europea EN-14651 y la Norma ASTM C-1609.

5.4.1 Ensayo bajo la normativa EN-14651.

El primer paso a ejecutarse antes de someter las probetas prismáticas al ensayo es realizar el entalle correspondiente a cada una de ellas, de acuerdo a la normativa deben ser de una profundidad de 25 [mm] y de ancho entre 2,5 a 3 [mm]. Cada una de las entallas es marcada previamente en cada viga, con huincha y escuadra para proveer que la ejecución del serrado se ejecute de manera óptima y no se desvíe.

Una vez realizado los entalles se debe realizar una limpieza de las viguetas, procurando que ninguna partícula de polvo, hormigón o fibra haya quedado en dicha abertura. En la cara opuesta a la cara de la entalla se pinta la proyección de la profundidad de la entalla, en este lugar se aplicará la carga axial (sección media de la probeta). En la cara de la entalla se marcan a cada uno de los lados un punto a 15 cm del centro de la entalla, este es el sitio donde se colocan los apoyos que sostendrán la probeta durante el ensayo.

El siguiente paso, previo al ensayo, es la instalación de una abrazadera en la cara del entalle a fin de poder recibir el transductor encargado de medir la abertura de la fisura de la probeta enviando las señales a la computadora encargada de procesar y entregar los datos del ensayo, este transductor se instala en el eje longitudinal de la probeta (Ver *Figura 5.5*). frente a la abrazadera se debe pegar una pequeña escuadra de aluminio en el eje longitudinal, este tiene por función limitar la extensión del transductor el cual tiene la capacidad de percibir hasta 10 [mm] de abertura de la fisura.

Al momento de tener todas las probetas preparadas con entalle, abrazadera y escuadra metálica se procede a la colocación en el equipo de ensayo.



Figura 5.5.: Probeta entallada con abrazadera que recibe al transductor y escuadra metálica.

5.4.1.1 Preparación del Equipo de Ensayo.

La normativa EN-14651 Establece que la probeta prismática debe ser apoyada sobre dos rodillos de acero los cuales tienen una sección transversal de 30 [mm] de diámetro y con una longitud de al menos 10 [mm] mayor al ancho de la probeta a fin de asegurar su estabilidad durante el ensayo, además existe un tercer rodillo en la cara superior de la probeta que es el que aplica la carga, tal como se aprecia en la *Figura 5.6*. La superficie del manto de estos rodillos debe ser completamente lisa y deben ser capaces de girar alrededor de su eje en un plano transversal al eje longitudinal de la probeta.

La distancia entre los centros de los dos rodillos de apoyo debe ser igual a 500 [mm], además todos los rodillos deben ajustarse en su posición correcta, teniendo todas las distancias una precisión de $\pm 2,0$ [mm].



Figura 5.6.: Probeta instalada según esquema general EN-14651.

Teniendo la probeta instalada en la prensa de ensayo correctamente alineada y centrada con respecto a los rodillos, tal como se indica en la *Figura 5.7*, se debe verificar que las conexiones del captador de desplazamiento a la computadora estén correctas teniendo en cuenta los canales de medición de la máquina. Cabe destacar que los ensayos se controlan desde el computador el cual está conectado a la consola de carga MCC8 y gracias al software instalado *MULTITEST* se registran y procesan los datos. La consola cuenta con 8 canales, de los cuales 4 corresponden a medición de carga y 4 a medición de desplazamiento o deformación.



Figura 5.7.: Aplicación del ensayo EN-14651.

5.4.1.2 Ejecución del ensayo.

Lo primero antes de comenzar el ensayo es regular adecuadamente los parámetros de ensayo desde el computador con el software *MULTITES*, estos generalmente varían según el tipo de ensayo, dimensiones de la probeta, deformación esperada, velocidad de ensayo, etc.

Ajustados correctamente los parámetros para la ejecución del ensayo, este se inicia aplicando a la probeta una precarga de 1 [kN] con una velocidad inicial de 0,83 [$\mu\text{m/s}$] a fin de estabilizar el sistema de ensayo. Una vez teniendo el ensayo completamente estabilizado se procede a aumentar la velocidad hasta 1 [$\mu\text{m/s}$].

Este ensayo tiene una duración aproximada de 20 minutos y se da por concluido cuando la abertura de la fisura alcanza los 5 [mm]. Finalizado el ensayo el software presenta todos los datos registrados en un archivo *Excel.xlsx* con el que se puede obtener la gráfica “Carga v/s Desplazamiento”.

5.4.2 Ensayo bajo la normativa ASTM C-1609.

Antes de la instalación de la probeta para proceder con el ensayo, es importante verificar se encuentre en óptimas condiciones, sin ningún tipo de partícula de hormigón sobresaliente ni restos de fibras. Si existe mucha irregularidad en la cara de llenado de la probeta es necesario realizar una limpieza o raspado para así evitar posibles irregularidades durante el ensayo.

Para la preparación de la probeta es necesario marcar los tercios de la vigueta en todas sus caras, cada 150 [mm], considerando que se debe dejar una luz libre de 40 [mm] en ambos extremos del prisma.

En el siguiente paso se procede a la instalación de la abrazadera, esta se pega en la cara opuesta a la que recibe la carga, el transductor instalado en esta abrazadera es el encargado de medir la apertura de la fisura que se va generando a medida que transcurre el ensayo. Este transductor se instala a lo largo del eje longitudinal de la probeta en la marca final del primer tercio, es fundamental dejar el tercio central de la probeta libre, ya que la fisura al no tener una dirección inducida, puede abarcar cualquier tramo del tercio central.

En el último tercio, y frente a la abrazadera del transductor, en el mismo sentido del eje longitudinal se deben pegar dos escuadras pequeñas de aluminio con una perforación central en la cara vertical. Estas dos escuadras tienen por función recibir el cuerpo de un perno con un cuadrado de vidrio pegado en su cabeza. La estructura de vidrio es la encargada de limitar la extensión del transductor a medida que ocurre el ensayo. Se escoge vidrio y no otro tipo de material ya que este nos asegura una superficie completamente lisa capaz de no influir en los datos transmitidos a la computadora durante el ensayo.

Al momento de tener todas las probetas preparadas con las marcas en los tercios, abrazadera y escuadras metálicas (*Ver Figura 5.8*), se procede a la colocación en el equipo y comienzo del ensayo.



Figura 5.8.: Probeta con las marcas de los tercios, abrazadera y escuadras.

Instalada la probeta sobre el equipo de ensayo, se procede a instalar una tercera estructura apoyada sobre el centro de la cara superior de la probeta, justo en el eje medio transversal del prisma, esta estructura contiene una escuadra de aluminio en cada extremo, tal como se muestra en la *Figura 5.9*, que tiene por función limitar al transductor encargado de medir la deflexión al centro del canto de la probeta a causa de la carga aplicada (*Flecha*). Luego se proceden a instalar dos abrazaderas metálicas, una a cada extremo de los tercios, que a su vez sirven de soporte para la estructura metálica instalada en la cara lateral a lo largo del eje longitudinal que recibe al transductor encargado de medir la flecha.



Figura 5.9.: Abrazaderas y estructura del transductor que mide la flecha.

Teniendo la probeta instalada en la prensa de ensayo, correctamente alineada y centrada con respecto a los rodillos, se debe verificar que las conexiones del captador de desplazamiento a la computadora estén correctas teniendo en cuenta los canales de medición de la máquina. Cabe destacar que los ensayos se controlan desde el computador, el cual está conectado a la consola de carga MCC8 y gracias al software instalado *MULTITEST* se registran y procesan los datos. La consola cuenta con 8 canales, de los cuales 4 corresponden a medición de carga y 4 a medición de desplazamiento o deformación.

5.4.2.1 Ejecución del ensayo.

Teniendo la probeta lista e instalada en el equipo, tal como se aprecia en la *Figura 5.10*, lo primero, antes de comenzar el ensayo, es regular adecuadamente los parámetros de ensayo desde el computador con el software *MULTITES*, estos generalmente varían según el tipo de ensayo, dimensiones de la probeta, deformación esperada, velocidad de ensaye, etc.

Ajustados correctamente los parámetros para la ejecución del ensayo, este se inicia aplicando a la probeta una precarga con una velocidad inicial de 0,5 [$\mu\text{m/s}$] a fin de

estabilizar el sistema de ensayo. Una vez teniendo el ensayo completamente estabilizado se procede a aumentar parcialmente la velocidad.

Este ensayo tiene una duración aproximada de 40 minutos y se da por concluido cuando la flecha alcanza una deformación de los 4 [mm]. Finalizado el ensayo el software presenta todos los datos registrados en un archivo *Excel.x/sx* con el que se puede obtener la gráfica “Carga v/s Flecha”.

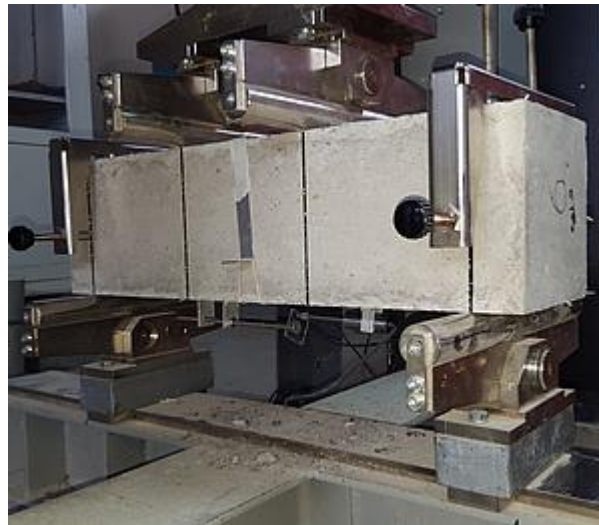


Figura 5.10.: Aplicación del ensayo ASTM C-1609 (LEMCO 2015).

5.4.3 Parámetros de los ensayos.

El control del equipo MCC8 se realiza por computadora mediante el software MULTITEST el cual tiene la cualidad de acomodarse a diversos tipos de ensayos, soportados por el equipo según la configuración y el ingreso de distintos parámetros previo a la ejecución de un ensayo. En la *Tabla 5.2*, se presentan las características a considerar para cada ensayo involucrado.

Tabla 5.2.: Características de ambos ensayos aplicados.

Ensayo	ASTM C-1609	EN-14651
Dimensiones	530x150x150 [mm]	600x150x150 [mm] con entalle
Luz	450 [mm]	500 [mm]
Carga aplicada	2/3	Central
Canal	5-6	5
Termino de ensayo	Flecha 4000 [µm]	Apertura 5000 [µm]

En la *Tabla 5.3*, se indican los distintos parámetros que deben ser configurados previo a la ejecución del ensayo bajo la normativa EN-14651 y bajo la normativa ASTM C-1609. Cabe destacar que los valores ajustados de los parámetros han sido establecidos bajo los criterios de las normas considerando campañas experimentales anteriores en las que se realizaron diversos ensayos de prueba para calibrar y recomendar los parámetros actualmente utilizados.

La recomendación para la norma EN-14651 con respecto a la velocidad es iniciarla con 1 [$\mu\text{m/s}$] y luego de que se estabiliza el ensayo post carga máxima se aumenta parcialmente hasta llegar a los 10 [$\mu\text{m/s}$]. Para la norma ASTM C-1609 con respecto a la velocidad se recomienda iniciarla con 0,5 [$\mu\text{m/s}$] y también luego de que se estabiliza el ensayo post carga máxima se aumenta parcialmente hasta llegar a los 10 [$\mu\text{m/s}$].

En la *Tabla 5.4*, se aprecian los parámetros ajustados durante la realización de cada uno de los ensayos, dichos parámetros son los recomendados para llevarlos a cabo de manera correcta según esta campaña experimental.

Tabla 5.3.: Parámetros a configurar previa ejecución de los ensayos.

Parámetro	Unidad	Descripción
Test Speed	$\mu\text{m/s}$	Velocidad de desplazamiento con el que se lleva a cabo el ensayo, este puede modificarse durante el test
Proportional	Kp	Constante proporcional de retroalimentación que modifica el flujo de aceite de la maquina generando variaciones de la velocidad de desplazamiento logrando que la velocidad real sea igual o teórica
Integrative	Ki	Constante integrativa de retroalimentación que modifica proporcionalmente las diferencias entre la curva real y la teórica
Error Threshold	Bit	Parámetro que permite al software identificar la precarga que se realiza en el inicio del test
Max Correction	Bit	Variable que tiene la finalidad de limitar la inestabilidad y oscilación del ensayo entre bandas positivas y negativas

Tabla 5.4.: Parámetros ajustados de acuerdo a cada ensayo.

Parámetros	ASTM C-1609	EN-14651
Kp	0,8	0,8
Ki	0,005	0,005
Error	20	20
Máx. Corrección	10/5/3	10/5/3
Velocidad de partida	0,5	1

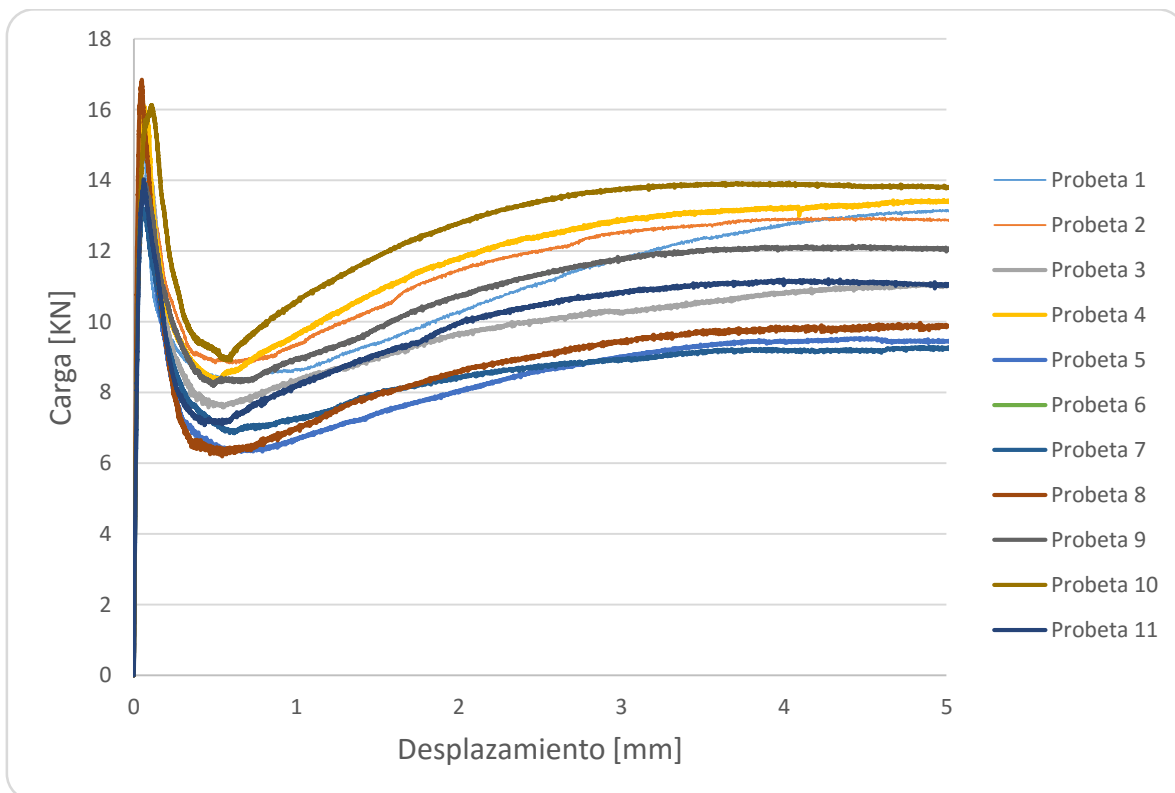
VI – RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos para los ensayos a flexión, bajo la normativa Europea EN-14651 y normativa Internacional ASTM C1609, para viguetas con entalles y viguetas con carga en los tercios respectivamente, estos resultados son representados mediante gráficas y tablas.

6.1 Resumen de resultados para el ensayo EN-14651.

Los resultados del ensayo a flexión de las viguetas entalladas son representados por el gráfico “carga v/s desplazamiento del borde de la fisura”. Cabe destacar que para todas las probetas ensayadas se aplicaron los mismos parámetros acotados en la *Tabla 5.4*.

Se presenta la *Gráfica 6.1* que muestra todas las curvas resultantes de los 11 ensayos, correctamente ejecutados, a probetas prismáticas con dosificación de fibras sintéticas de 8 [kg/m³]. En la *Tabla 6.1* se destacan algunos parámetros relevantes obtenidos para cada uno de los ensayos a flexión ejecutados bajo esta norma.



Gráfica 6.1.: Resumen de resultados, Carga vs Desplazamiento al borde de la fisura según normativa EN-14651

Claramente, al observar las gráficas se puede inferir que existen tres tramos notoriamente definidos y diferenciados el uno del otro. El primer tramo ascendente, muestra una inclinada pendiente casi lineal, hasta llegar al peak de carga la cual corresponde a la máxima soportada por el HRF. El segundo tramo, corresponde a un descenso en la curva con pendiente negativa, esto indica puntualmente la falla del hormigón ensayado sin la acción de recuperación que ejerce la fibra. El último y tercer tramo que se puede observar en el resumen de las gráficas, corresponde al trabajo de resistencia que ejerce la fibra sintética en el HRF, se representa por una curva con pendiente positiva, bastante menor en comparación al primer tramo, pero se destaca su ascendencia en la Resistencia.

**Nota: Las gráficas individuales para cada uno de los ensayos realizados se encuentran adjuntas en el Anexo.*

En la *Tabla 6.1*, se presenta un resumen general de algunos datos relevantes, entregados para cada ensayo bajo la norma EN-14651 después de concluir.

Tabla 6.1: Resumen de resultados de distintos parámetros a estudiar.

PROBETA	Carga máxima [kN]	Desplazamiento en carga máxima [mm]	Carga en el desplazamiento total [kN]	Desplazamiento total [mm]
1	14,397	0,058	11,454	7,003
2	13,959	0,079	12,816	5,313
3	15,880	0,050	10,996	6,129
4	16,097	0,065	13,402	5,174
5	13,686	0,069	9,446	5,020
6	15,016	0,045	12,211	5,033
7	13,207	0,054	8,842	6,725
8	16,845	0,050	9,926	5,197
9	13,911	0,072	12,042	5,042
10	16,130	0,111	13,775	5,034
11	14,031	0,062	10,974	5,228
Promedio	14,833	0,065	11,444	5,536

En general, la carga máxima soportada por las probetas es cercana a los 15 [kN], esta corresponde a la resistencia contribuida por la mezcla de hormigón llegando a alcanzar casi los 17 [kN] en un caso particular. El desplazamiento del borde de la fisura alcanzado en la aplicación de carga máxima tiende a ser de 0,065 [mm] escapándose en algún caso particular a más de 0,1 [mm], lo cual sigue siendo moderado.

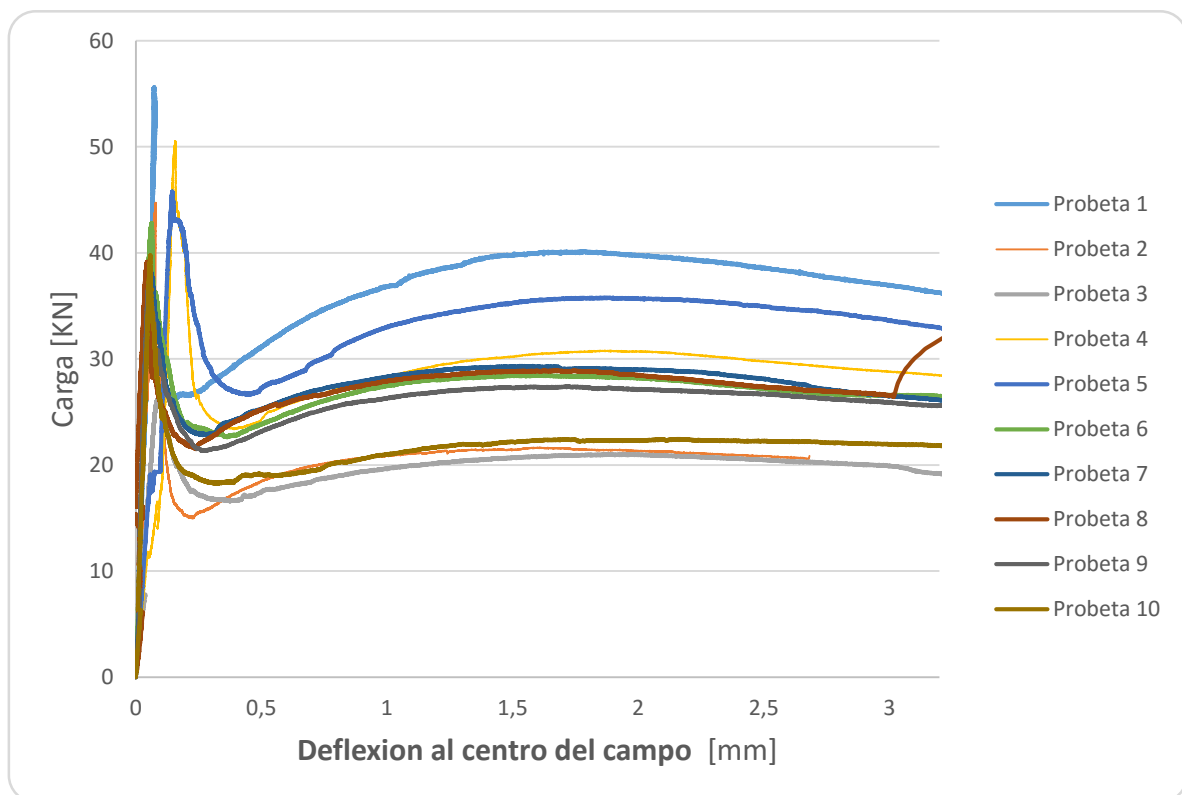
Después del agrietamiento, las fibras son capaces de alcanzar una resistencia a cargas cercanas a los 14 [kN], lo cual es bastante considerable, teniendo en cuenta la tendencia de carga máxima soportada por el hormigón mencionada anteriormente.

La carga final soportada, antes de concluir cada ensayo, varía en un rango de entre 9 a 14 [kN], esta amplia variación de carga es totalmente común, y se debe a diversos factores difícilmente controlados que influyen directamente al comportamiento frente a las cargas, como lo puede ser la distribución de las fibras en el hormigón, irregularidades geométricas en la probeta, etc.

6.1 Resumen de resultados para el ensayo ASTM C-1609.

Los resultados del ensayo a flexión, de las viguetas con cargas a los dos tercios, son representados por las gráficas de “carga v/s flecha” (*deflexión al centro del canto*). Cabe destacar que, para cada uno de los ensayos de las 10 probetas analizadas se aplicaron los parámetros según la *Tabla 5.4* mencionada anteriormente.

Se muestra la *Gráfica 6.2*, la cual representa todas las curvas resultantes de los 10 ensayos correctamente ejecutados a probetas prismáticas, con cargas a los dos tercios y con una dosificación de fibras sintéticas de 8 [kg/m³]. En la *Tabla 6.2* se destacan algunos parámetros relevantes obtenidos en cada uno de los ensayos bajo esta normativa.



Gráfica 6.2.: Resumen de Resultados, Carga vs Flecha según normativa ASTM C-1609.

Se observan claramente tres tendencias de curva existentes en las gráficas, notoriamente definidas y diferenciadas, pero con un gran rango de variación en comparación a los resultados de la normativa Europea.

El primer tramo es ascendente y presenta una exagerada verticalidad en su pendiente, hasta llegar al peak de carga, la cual corresponde a la máxima carga soportada por la vigueta de HRF antes de la primera fisura. La resistencia a la carga en este tramo es

mayor si la comparamos a los resultados esperados por la norma Europea, esto debido a que la carga no es puntual y se distribuye dentro del tercio central. El segundo tramo, claramente corresponde a un descenso en la curva, con una pendiente negativa, también presenta en la mayoría de los casos una importante verticalidad de caída, este comportamiento es esperado, ya que, al no inducirse la grieta, esta se propaga por las zonas más débiles de la mezcla de forma abrupta. El último y tercer tramo que se observa en el resumen de las gráficas, corresponde al trabajo de resistencia que ejerce la fibra sintética en el HRF, se presenta una curva con pendiente positiva bastante menor en comparación al primer tramo y una tendencia a la horizontalidad. Cabe destacar que, para efectos de esta normativa, solo se consideran las probetas ensayadas que presenten fisura dentro del tercio central, el resto es descartado para el análisis.

**Nota: Las gráficas individuales para cada uno de los ensayos realizados se encuentran adjuntas en el Anexo.*

En la *Tabla 6.2*, se presenta un resumen general de los datos más relevantes, resultado de cada ensayo bajo la norma ASTM C-1609 luego de ser concluidos.

Tabla 6.2.: Resumen de los parámetros a considerar.

PROBETA	Carga máxima [kN]	Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm]	Carga en el desplazamiento de Flecha total [kN]	Desplazamiento Flecha total [mm]
1	55,634	0,073	36,062	3,256
2	44,722	0,079	20,863	2,682
3	26,121	0,084	7,565	7,371
4	50,523	0,157	24,366	6,423
5	45,777	0,146	33,857	4,124
6	42,804	0,064	29,762	5,650
7	38,739	0,054	19,793	6,503
8	39,158	0,045	14,604	6,864
9	37,275	0,054	31,269	4,790
10	39,764	0,064	4,371	7,245
Promedio	42,052	0,082	22,251	5,491

En aspectos generales, la carga máxima soportada por las probetas ensayadas es cercana a los 42 [kN], esto corresponde directamente a la resistencia de la mezcla de hormigón llegando a superar en un caso particular los 55 [kN]. La deflexión alcanzada al centro del canto, al momento de la carga máxima, varía entre los 0,05 y los 0,15 [mm].

Durante el ensayo, las fibras son capaces de aportar una resistencia frente a cargas cercanas a los 30 [kN] en la mayoría de los resultados analizados.

La carga final soportada por las probetas, antes de concluido cada ensayo, es cercana a los 22 [kN], bastante baja considerando la tendencia de carga máxima en el peak anteriormente mencionado. Esto es producto de múltiples factores que influyen directamente en la respuesta del HRF frente a la aplicación de distintas cargas, tales como, orientación de las fibras dentro de la mezcla ensayada, diversidad en la manipulación de los parámetros durante cada uno de los ensayos, etc.

VII – ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

El principal análisis resultante para los ensayos a flexotracción es el de cuantificar la resistencia residual, para el caso de la norma europea esta resistencia se mide según los parámetros de CMOD, mientras que la norma internacional ASTM analiza la resistencia según la deflexión al centro del canto de la vigueta.

Se pretende analizar en profundidad las resistencias residuales derivadas de ambos ensayos, realizados a probetas de hormigón reforzadas con fibra sintética EPC Barchip 54. El fin principal es reconocer y cuantificar el aporte que realiza este tipo de fibra a la mezcla de hormigón, luego de fisurarse bajo diversas cargas sometidas. En simples palabras, es el aporte de la fibra sintética para mantener estable la estructura de hormigón.

7.1 Análisis de los resultados para el ensayo EN-14651.

Las resistencias residuales se han obtenido según las indicaciones de la norma EN-14651 y en base a la fórmula de la *Ecuación 2.3* del Capítulo II. Esta ecuación destaca que es indispensable para esta operatoria conocer los valores de carga para cada CMOD.

En la *Tabla 7.1*, se indican los valores de carga F_j correspondientes a cada valor de CMOD_j en [kN].

Tabla 7.1.: Carga según distinto CMOD.

CARGA según distintos valores de CMOD en [kN]				
PROBETA	0,5	1,5	2,5	3,5
Probeta 1	8,838	11,049	12,398	12,927
Probeta 2	8,893	10,961	12,393	12,878
Probeta 3	7,66	9,311	10,24	10,808
Probeta 4	8,562	11,302	12,774	13,195
Probeta 5	6,375	7,687	8,897	9,439
Probeta 6	8,031	10,564	11,887	12,452
Probeta 7	6,932	8,171	8,877	9,194
Probeta 8	6,373	8,198	9,351	9,82
Probeta 9	8,398	10,283	11,687	12,046
Probeta 10	8,996	12,295	13,651	13,927
Probeta 11	7,203	9,403	10,738	11,175
PROMEDIO	7,842	9,929	11,172	11,624

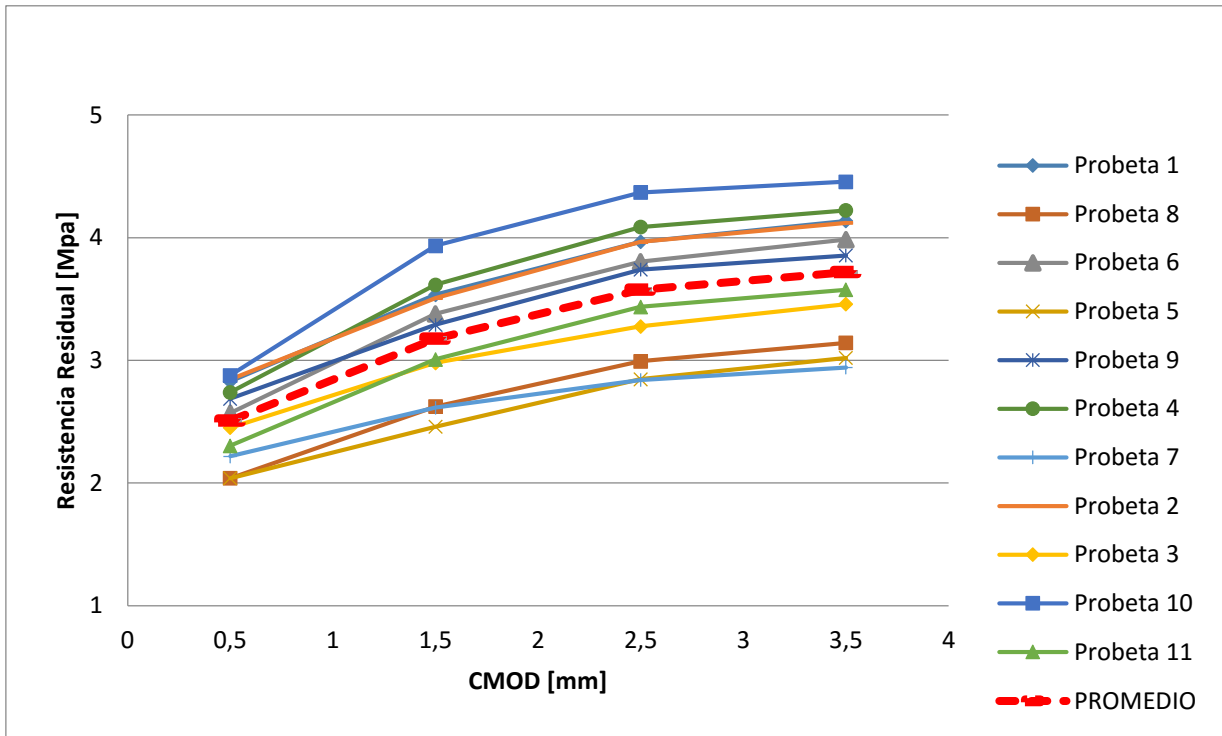
De acuerdo a los valores de cargas entregados en la *Tabla 7.1*, y según la fórmula de la *Ecuación 2.3* del Capítulo II, se presenta la *Tabla 7.2*. Esta tabla indica los valores resultantes de resistencias residuales obtenidos según CMOD, para cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 7.2: Valores de resistencia residual según CMOD.

RESISTENCIA RESIDUAL en [MPa] según distintos valores de CMOD en [mm]				
PROBETA	0,5	1,5	2,5	3,5
Probeta 1	2,828	3,536	3,967	4,137
Probeta 2	2,846	3,508	3,966	4,121
Probeta 3	2,451	2,980	3,277	3,459
Probeta 4	2,740	3,617	4,088	4,222
Probeta 5	2,040	2,460	2,847	3,020
Probeta 6	2,570	3,380	3,804	3,985
Probeta 7	2,218	2,615	2,841	2,942
Probeta 8	2,039	2,623	2,992	3,142
Probeta 9	2,687	3,291	3,740	3,855
Probeta 10	2,879	3,934	4,368	4,457
Probeta 11	2,305	3,009	3,436	3,576
PROMEDIO	2,509	3,177	3,575	3,720

La *Grafica 7.1* representa las curvas de resistencias residuales para cada probeta ensayada y además la tendencia promedio de las mismas.

**Nota: La tendencia promedio en la gráfica es representada con línea segmentada.*



Grafica 7.1.: Resistencia Residual vs CMOD fibra sintética 8 [kg/m³].

La tendencia de la fibra sintética, para todos los casos ensayados, es a aumentar la resistencia residual a medida que es mayor el CMOD. Existe un claro aumento significativo en los tres primeros CMOD_j, siendo regular en la última transición del CMOD₃ = 2,5 [mm] al CMOD₄ = 3,5 [mm], lo que significa que, el aumento de resistencia es muy leve, pero aun así es existente. En simples palabras la resistencia residual va creciendo desde el CMOD₁ hasta el CMOD₄, comportamiento frecuente en fibras del tipo sintética y no así en las del tipo metálicas.

Por otra parte, se observa que, el valor máximo de resistencia residual mediante la adición de fibras sintéticas EPC Barchip 54, se alcanza en el CMOD₄, esto indica que la fibra sigue trabajando durante todo el ensayo, aun después de producirse el agrietamiento, mostrando una clara recuperación creciente a medida que aumenta el desplazamiento al borde de la fisura.

La resistencia residual en CMOD₄, en función del desplazamiento en el borde de la fisura, llega a alcanzar un valor máximo de 4,457 [MPa] promediando un valor cercano a los 3,7 [MPa], lo que es bastante optimo, considerando que son fibras sintéticas y no de acero.

Otra de las conclusiones extraídas, en base a la Norma UNE EN-14651, en la que nos dice que “El contenido de fibras debe determinarse para obtener una resistencia residual media de al menos, 1,5 [MPa] en CMOD₁ y una resistencia residual a flexión media de al menos 1 [MPa] en CMOD₄.” Y es que el contenido de fibras sintéticas utilizado, ha sido suficiente para alcanzar una resistencia residual en CMOD₁ promedio de 2,5 [MPa].

En cuanto a $CMOD_4 = 3,5$ [mm], podemos observar que la cantidad de fibras, también es la suficiente para alcanzar el valor indicado en la norma UNE EN-14651, siendo éste muy superior a 1[MPa] en todos los casos ensayados.

Los límites de proporcionalidad se han obtenido según las indicaciones de la norma EN-14651 y en base a la fórmula de la *Ecuación 2.2* del Capítulo II. Esta ecuación nos indica que es indispensable, para esta operatoria, conocer el valor de carga máxima de la primera fisura, la cual está definida como el mayor valor de carga en el intervalo de CMOD de 0 a 0,05 [mm].

En la *Tabla 7.3* se indican los valores de carga y límite de proporcionalidad para cada probeta ensayada.

Tabla 7.3.: Valores de carga máxima y Lop en primera fisura según EN-14651.

PROBETA	Carga [kN]	Lop [Mpa]
Probeta 1	14,376	4,600
Probeta 2	13,546	4,335
Probeta 3	15,697	5,022
Probeta 4	15,805	5,058
Probeta 5	13,376	4,280
Probeta 6	14,543	4,654
Probeta 7	13,186	4,220
Probeta 8	16,250	5,200
Probeta 9	13,652	4,369
Probeta 10	14,939	4,780
Probeta 11	13,708	4,387
PROMEDIO	14,462	4,628

Con los valores obtenidos de Resistencia Residual y Lop se ejecuta el criterio de clasificación a tracción de los HRF, según el “*Código Modelo 2010 Resistencia Residual Mínima*” para fines estructurales.

Para que las fibras puedan ser consideradas con función estructural, la resistencia característica residual a tracción por flexión fR_{1k} no debe ser inferior al 40% del límite de proporcionalidad. A su vez, fR_{3k} no debe ser inferior al 50% del límite de proporcionalidad.

En la *Tabla 7.4* se encuentran los valores promedio de Lop y Resistencias residuales para los 11 casos ensayados, con sus respectivos valores de resistencias características.

Tabla 7.4.: Valores de Resistencias Características.

Resistencia Característica	Lop	0,5	1,5	2,5	3,5
PROMEDIO	4,628	2,509	3,177	3,575	3,720
Desviación	0,345	0,318	0,476	0,529	0,523
$F_{j,k}$	4,060	1,986	2,395	2,705	2,859
	$f_{R_{Lk}}$	$f_{R_{1k}}$	$f_{R_{2k}}$	$f_{R_{3k}}$	$f_{R_{4k}}$

De acuerdo a los valores de resistencia característica, La Fibra Barchip 54 cumple con la caracterización estructural. Se observa en la *Tabla 7.5*, el análisis pertinente según el “Código Modelo 2010 Resistencia Residual Mínima” y la proporción de resistencias residuales.

Tabla 7.5.: Clasificación a tracción del comportamiento de la Fibra.

FIBRA ESTRUCTURAL 8 [kg/m3]		
$f_{R_{1k}}/f_{R_{Lk}}$	0,489 >0,4	Cumple
$f_{R_{3k}}/f_{R_{1k}}$	1,362 >0,5	Cumple
$f_{R_{3k}}/f_{R_{1k}}$	1,362 >1,3	Endurecimiento intenso

7.2 Análisis de los resultados para el ensayo ASTM C-1609.

Las resistencias residuales según distintos valores de flecha, se han obtenido según las indicaciones de la norma ASTM C-1609 y en base a la fórmula de la *Ecuación 2.4* del Capítulo II. Esta fórmula requiere identificar los valores de carga según la deflexión al centro del canto según las deformaciones L/600 y L/150.

En la *Tabla 7.6*, se indican los valores de carga pertinentes a cada ensayo según flecha.

Tabla 7.6.: Valores de Carga según Flecha.

CARGAS en [kN] según deflexión en L/600 y L/150		
PROBETA	0,75	3
Probeta 1	34,278	37,313
Probeta 2	19,521	20,769
Probeta 3	18,303	20,263
Probeta 4	26,698	28,866
Probeta 5	29,049	34,533
Probeta 6	25,973	26,626
Probeta 7	26,675	27,619
Probeta 8	25,814	27,607
Probeta 9	24,541	26,432
Probeta 10	19,444	22,139
PROMEDIO	25,030	27,217

De acuerdo a los valores de cargas entregados en la *Tabla 7.6*, y según la fórmula de la *Ecuación 2.4* del Capítulo II, se presenta la *Tabla 7.7*. Esta tabla entrega los valores resultantes de resistencias residuales según Flecha, para cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 7.7.: Valores de resistencia residual según Flecha.

RESISTENCIAS RESIDUALES en [Mpa] según deflexion en L/600 y L/150		
PROBETA	0,75 [mm]	3 [mm]
Probeta 1	4,570	4,975
Probeta 2	2,603	2,769
Probeta 3	2,440	2,702
Probeta 4	3,560	3,849
Probeta 5	3,873	4,604
Probeta 6	3,463	3,550
Probeta 7	3,557	3,683
Probeta 8	3,442	3,681
Probeta 9	3,272	3,524
Probeta 10	2,593	2,952
PROMEDIO	3,337	3,629

De acuerdo a los valores presentados en la *Tabla 7.6* y la resultante *Tabla 7.7*, existen probetas ensayadas que entregan resultados que se alejan del resto de la muestra, como lo son la *Probeta 1* y la *Probeta 5*.

Para confirmar la veracidad de estos valores se recurre al criterio de “Dixon Test”, el cual tiene como propósito confirmar la sospecha de valores discrepantes (*outliers*) basados en el ordenamiento de los datos y en la verificación de los valores extremos.

La prueba Dixon arroja lo siguiente:

Summary statistics:

Variable	Observations	Obs. with missing data	Obs. without missing data	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
Var1	10	0	10	2,440	4,570	3,337	0,653

Dixon test for outliers / Two-tailed test:

R10 (Observed value)	0,327
R10 (Critical value)	0,465
p-value (Two-tailed)	0,247

alpha 0,05

The p-value has been computed using 1000000 Monte Carlo simulations.

99% confidence interval on the p-value:

] 0,245; 0,248 [

Test interpretation:

H0: There is no outlier in the data

Ha: The minimum or maximum value is an outlier

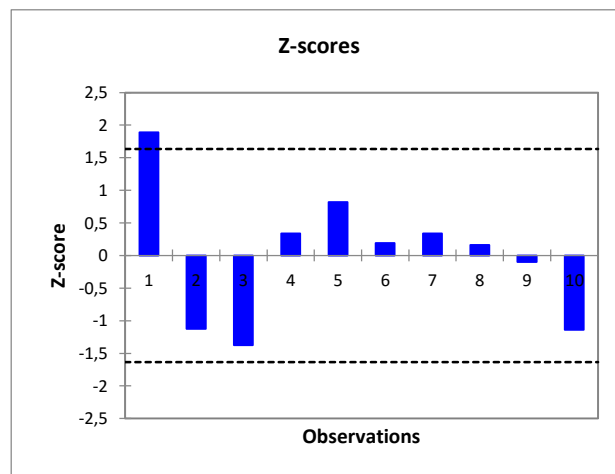
As the computed p-value is greater than the significance level $\alpha=0,05$, one cannot reject the null hypothesis H0.

The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is 24,65%.

Z-scores:

Value	Z-score
4,570	1,889
2,603	-1,125
2,440	-1,374
3,560	0,341
3,873	0,821
3,463	0,193
3,557	0,337
3,442	0,160
3,272	-0,100
2,593	-1,141

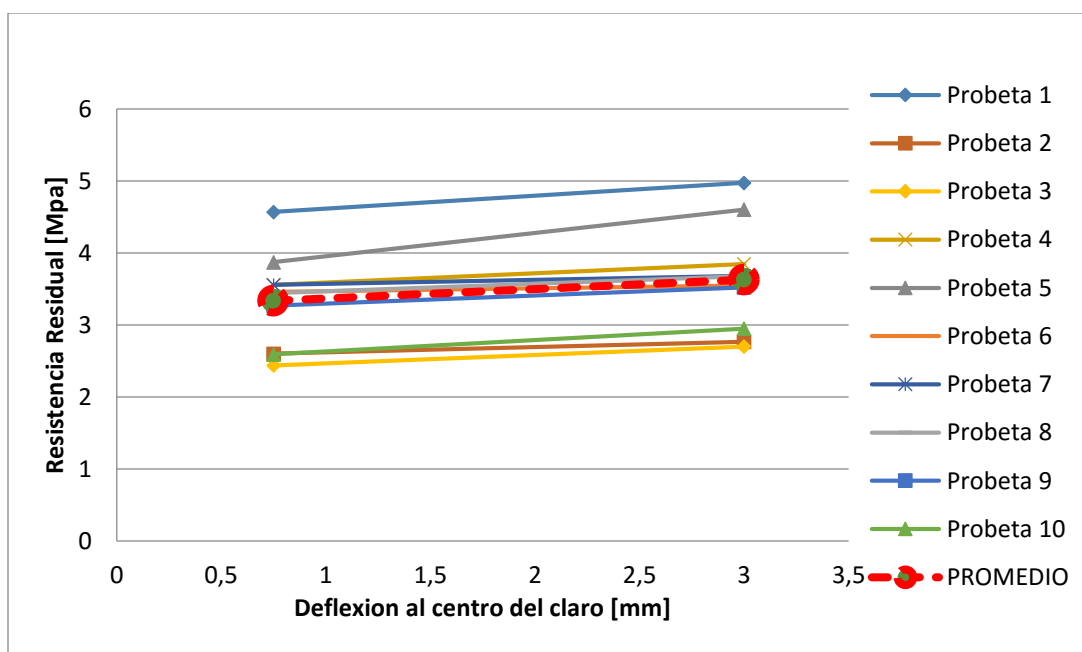
Values displayed in bold are outliers



Por lo tanto, según la prueba de Dixon, todos los resultados de resistencias residuales son verídicos, y legítimos para su análisis correspondiente.

La *Gráfica 7.2* representa las curvas de resistencias residuales para cada probeta ensayada bajo la norma ASTM, y además la tendencia promedio de las mismas.

**Nota: La tendencia promedio en la gráfica es representada con línea segmentada.*



Gráfica 7.2.: Resistencia Residual vs Flecha fibra sintética 8 [kg/m3].

De la gráfica anterior se observa que la tendencia de la fibra sintética, en todos los casos ensayados, es a aumentar la resistencia residual a medida que va aumentando la deflexión al centro del canto. Claramente el aumento del valor de la resistencia entre L/600 y L/150 no es inmensamente significativo, pero mantiene la tendencia de aumentar hasta el término del ensayo, lo cual es relevantemente positivo, ya que deja en claro que este tipo de fibra si cumple con los resultados esperados y muestra una clara tendencia de recuperación creciente.

El máximo valor de resistencia residual alcanzado en todos los casos se encuentra en L/150 = 3 [mm]. Esto indica el trabajo de resistencia que ejerce la fibra frente a cargas continuas después de producirse el agrietamiento del hormigón. En ese punto, la resistencia residual llega a un valor máximo cercano a los 5 [MPa] en un caso particular, promediando un valor cercano a los 3,6 [MPa]. Este resultado es bastante positivo considerando las

condiciones de este ensayo, confirmando la efectividad tangible de este tipo de fibra sintética para el hormigón.

Las resistencias equivalentes se han obtenido según las indicaciones de la norma ASTM C-1609 y en base a la fórmula de la *Ecuación 2.5* del Capítulo II. Esta ecuación indica que es indispensable para esta operatoria conocer el valor de la tenacidad en L/150 para cada uno de los ensayos ejecutados.

En la *Tabla 7.8*, se indican los valores de T150 resultantes en los ensayos ejecutados bajo esta normativa.

Tabla 7.8.: Valores de T150.

TENACIDAD según deflexion en L/150	
PROBETA	3 mm
Probeta 1	103,350
Probeta 2	52,014
Probeta 3	52,497
Probeta 4	83,941
Probeta 5	89,159
Probeta 6	79,460
Probeta 7	73,503
Probeta 8	64,884
Probeta 9	68,131
Probeta 10	58,656
PROMEDIO	72,559

De acuerdo a la normativa ASTM C-1609, es rigurosamente efectivo conocer el valor de RDT_{150} , e incluso, tiene una mayor veracidad representativa de la muestra en comparación al valor de resistencia residual RL/150. Esto debido a que la tenacidad representa el área bajo la curva *Resistencia Residual v/s Flecha*, curva compleja que posee una infinidad de tendencias posibles, la cual no es totalmente representada por una resistencia residual obtenida desde el punto de deformación en 3 [mm].

La Resistencia equivalente se calcula de manera inversa a la residual, es decir, de acuerdo al valor de tenacidad T_{150} obtenido calculamos la resistencia equivalente a esta tenacidad, la cual es totalmente representativa de la muestra.

Según los valores de tenacidad, entregados en la *Tabla 7.8*, y de acuerdo a la fórmula de la *Ecuación 2.5* del Capítulo II, se presenta la *Tabla 7.9*. Esta tabla indica los valores resultantes de resistencias residuales equivalentes obtenidas según T_{150} , para cada uno de los casos analizados.

Tabla 7.9.: Resistencia Residual equivalente según T150.

PROBETA	RDT ₁₅₀
Probeta 1	4,593
Probeta 2	2,312
Probeta 3	2,333
Probeta 4	3,731
Probeta 5	3,963
Probeta 6	3,532
Probeta 7	3,267
Probeta 8	2,884
Probeta 9	3,028
Probeta 10	2,607
PROMEDIO	3,225

Estos valores de resistencia equivalente son genuinamente representativos a la tenacidad del HRF ensayado. La resistencia equivalente indica el trabajo de recuperación que ejerce la fibra frente a cargas constantes después de producirse la fisura en el hormigón. La resistencia equivalente llega a un valor máximo cercano a los 4,5 [MPa] en la primera muestra, promediando un valor cercano a los 3,2 [MPa]. Estos valores de resistencia son menores en comparación a las resistencias residuales obtenidas en el mismo punto de deformación, aun así, son más representativos y confirman la capacidad de aporte estructural de las fibras sintéticas *EPC Barchip 54*.

De acuerdo a los valores presentados de RDT₁₅₀ en la *Tabla 7.9* se obtiene la relación de proporcionalidad que existe entre la R_{peak} y la Resistencia equivalente de cada probeta ensayada, la *Tabla 7.10* expone claramente esta relación.

Tabla 7.10.: Relación entre Resistencia equivalente y Resistencia peak.

PROBETA	RDT ₁₅₀	R _{peak}	RDT ₁₅₀ /R _{peak}
Probeta 1	4,593	7,418	0,619
Probeta 2	2,312	5,963	0,388
Probeta 3	2,333	3,483	0,670
Probeta 4	3,731	6,736	0,554
Probeta 5	3,963	6,104	0,649
Probeta 6	3,532	5,707	0,619
Probeta 7	3,267	5,165	0,632
Probeta 8	2,884	5,221	0,552
Probeta 9	3,028	4,970	0,609
Probeta 10	2,607	5,302	0,492
PROMEDIO	3,225	5,607	0,578

VIII – CONCLUSIONES.

En base a los resultados obtenidos durante la campaña experimental, realizada en las dependencias del laboratorio de ensaye LEMCO y de acuerdo a los análisis de resultados obtenidos, se obtienen diversas conclusiones en relación a los ensayos de flexotracción según las normas EN-14651 y ASTM C-1609, normas utilizadas para la obtención de resistencias residuales a la tracción por flexión de las muestras de hormigón reforzado con fibras sintéticas.

Es importante mencionar que previo a la confección de las viguetas de HRF, existe una investigación y análisis minucioso de cada material a utilizar, realizando ensayos competentes que respaldan la elección y dosificación de cada uno de ellos.

Con respecto a la confección de las probetas de HRF, éstas deben ser preparadas cuidadosamente siguiendo paso a paso cada proceso de hormigonado y un correcto curado, a fin de, no tener influencias negativas en los resultados por causa de un mal procedimiento de preparación. La limpieza y mantención del moldaje es fundamental para evitar las irregularidades geométricas en las probetas, para el caso de las probetas ensayadas bajo la norma Europea, se debe tener especial cuidado con el entalle, realizándose tal cual lo exige la norma evitando variaciones en los resultados producto de un mal entalle.

Durante el proceso de los ensayos, es indispensable cumplir con la instalación correcta de la probeta en el equipo de ensaye, centrar idealmente la probeta en ambos ejes y verificar la correcta ubicación de los rodillos. Lógicamente, los parámetros deben ser los mismos para cada ensayo realizado bajo la misma norma a fin de evitar influencias en los resultados. Los transductores cumplen un rol vital en este proceso, estos deben ser verificados cada vez que se comienza un nuevo ensayo.

Al comparar el hormigón convencional con el HRF, este último es capaz de presentar una mayor deformación y una alta resistencia a elevadas cargas después de la fisuración, hasta que falla la adherencia de las fibras.

La adición de fibra sintética mejora claramente en el hormigón su tenacidad, la ductilidad frente a la flexión, su capacidad de resistencia a las cargas y aumenta la capacidad de absorción de energía. Con respecto a la durabilidad, la presencia de fibras permite una mejor redistribución de las fisuras. Las fibras en el hormigón restringen el crecimiento de las fisuras, ya que, al fisurarse la carga es transmitida y atacada directamente por las fibras.

Los resultados presentados en esta investigación son considerados fiables, como también todas las dosificaciones y medidas que han sido aplicadas de acuerdo con las prácticas comunes de ensayos dentro de la disciplina.

En la actualidad, los HRF se comienzan a utilizar de forma exponencial, no tan solo por sus variadas ventajas de aplicación, sino también, por la capacidad de trabajo estructural que puede alcanzar, remplazando incluso, en algunos casos al hormigón convencional reforzado con acero.

Como se ha demostrado, las fibras sintéticas poseen diversas ventajas en comparación a la utilización de fibras de acero; desde su precio, manipulación y trabajabilidad del hormigón, peso, formación de bolas de fibra sin hormigón en su interior, etc. Pero un dato no menor de las fibras sintéticas es la característica de no ser afectadas por la corrosión. Este punto es de vital importancia si se requieren, por ejemplo, trabajos en la industria minera, en donde es muy común la presencia de sales minerales en excavaciones profundas, o también, la utilización de HRF en sectores costeros, donde el contacto con el mar es muy cercano e incluso directo y la corrosión produce un desgaste importante del acero y una notable disminución de la resistencia del hormigón.

Todo el análisis de resultados obtenidos es ideal para realizar comparaciones con futuras líneas investigativas, en donde se requiera trabajar con otro tipo de dosificación de fibra sintética e incluso con otras fibras existentes en el mercado, a modo de enriquecer y ampliar el conocimiento ante la respuesta de cada dosificación y tipo de fibra frente a las variadas aplicaciones de cargas.

La adición de fibra sintética al hormigón aumenta significativamente su resistencia, presenta una mejoría ante la carga máxima en el peak de la curva, y una excelente respuesta post fisuración, que es el momento en el cual más trabajo realiza la fibra añadida. La fibra permite al hormigón una rotura más dúctil y homogénea a medida que transcurre el ensayo, llegando incluso a la tendencia de aumentar su resistencia después de la fisura, a lo largo del ensayo. Es importante recordar que los hormigones convencionales sin la presencia de ningún tipo de fibra, sufren una rotura de comportamiento frágil después del peak.

En forma general, la menor resistencia residual con respecto a la apertura se logra en el $CMOD_1 = 0,5$ [mm] y la máxima resistencia residual se alcanza en el $CMOD_4 = 3,5$ [mm]. Esto demuestra claramente la capacidad que posee la fibra EPC Barchip-54 de recuperación creciente mediante transcurre el ensayo. Durante el proceso y luego de la primera fisuración, las fibras se acomodan con dificultad al recorrido de la grieta lo que genera una baja resistencia postfisuración, posterior a esto las fibras aumentan la capacidad de resistencia a medida que se estabiliza el ensayo realizando un trabajo con respuesta eficaz. Con respecto a la deflexión al centro del canto (flecha) la menor resistencia residual se encuentra en $L/600 = 0,75$ [mm] y la máxima resistencia residual se alcanza en $L/150 = 3$ [mm]. Esto demuestra que la fibra EPC Barchip-54 aporta una respuesta positiva al hormigón frente a la recuperación de la flexión y un alto nivel de tenacidad para mantener la rigidez de la estructura, a pesar de la presencia de fisuras.

Es destacable mencionar que un HRF con dosificación intermedia de fibras sintéticas tiende a aumentar su capacidad de resistencia, tenacidad, absorción de energía y recuperación, en comparación a un HRF con bajas dosis de fibra. Los valores de Lop y resistencias características son notoriamente mayores en comparación a un hormigón con baja dosis de fibra (*ver Anexo 37*), y como es de esperar las resistencias características obtenidas también lo son.

La respuesta del HRF con $8kg/m^3$ de fibra sintética es bastante positiva si la comparamos con el mismo tipo de hormigón, bajo las mismas condiciones de confección y ensayo, pero con una dosis baja de fibra, cercana a los $4Kg/m^3$ (*ver Anexo 67*). Es tal la diferencia entre ambos HRF que solo el hormigón con dosis intermedia cumple con los

criterios para fines estructurales tal como se demostró en el *capítulo 7 “Análisis de los resultados”*. En el *Anexo 38*, se presentan los análisis de los resultados del mismo hormigón con bajas dosis de fibra donde se demuestra que no tiene la capacidad de cumplir con los criterios mínimos para ser considerado como estructural.

Si comparamos el aporte a la tenacidad de la fibra sintética en el HRF con dosis intermedia de fibras versus el mismo HRF con baja dosis de fibras (*ver anexo 68*), la diferencia es importantísima. El resultado promedio de tenacidad alcanzado con dosis intermedia a los 3 [mm] de deflexión al centro del canto es de 73 [J], para el caso de dosis bajas de fibra el mismo promedio es menor a la mitad. Lo mismo ocurre si comparamos las resistencias equivalentes resultantes de cada dosificación de fibra, la diferencia es claramente perjudicial para el HRF con 4[kg/m³] de fibra. Esto se debe a que al añadir un mayor número de fibras en el hormigón incrementa una gran mejora en la tenacidad de fractura, ya que esta depende de la cantidad de fibras que se encuentren en la zona donde se provoca la fisura.

REFERENCIAS.

- NCh 148 Of. 1968, Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales.
- NCh 163 Of. 1979, Áridos para morteros y hormigones - Requisitos Generales.
- NCh 164 Of. 1976, Áridos para morteros y hormigones - Preparación y extracción de muestras.
- NCh 165 of 1977, Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría.
- NCh 1037 of 1977, Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cubicas y cilíndricas.
- NCh 1116 Of. 1977, Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente.
- NCh 1117 Of. 1977, Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.
- NCh 1172 of 1978, Hormigón – Refrentado de probetas.
- NCh 1239 Of. 1977, Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las arenas.
- EN-14651 of 2008, Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).
- ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
- Revista Ingeniería de Construcción, Vol.24 N°1, Comportamiento al corte de hormigones reforzados con fibras de acero, Sergio Carmona – Manuel Cabrera. 2009.
- Hormigones con Fibras de acero, Características Mecánicas. Patricia Cristina Mármol Salazar. 2010.
- Construcción y aplicaciones del HRF, Avances en tecnología del Hormigón. Ana Blanco, Diciembre 2015.
- ¿Cómo y porque mejorar la calidad de los pavimentos? Seminario Internacional Pavimentos de Hormigón, Paolo Chioma Valenzuela – EPC. 2015.

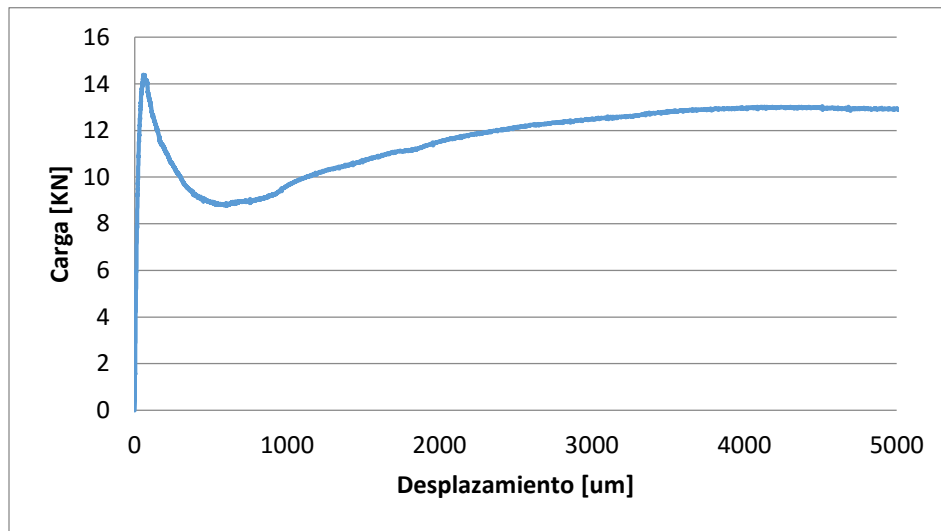
- Cemento Polpaico 400, Ficha Comercial de Productos, Polpaico.
- Concrete, Hormigón Reforzado con Fibras, Building Trust SIKA.
- Ficha Técnica 1a, Cemento Polpaico P400. Áridos, Cementos, Asfaltos y Hormigones. Polpaico 2015
- Barchip 54 is Unequaled in Usability, Durability and Service Performance. Product Info, Elasto Plastic Concrete 2013.
- Ficha Técnica Sika Viscocrete 5100 CL, Sika, Septiembre 2015.
- Análisis comparativo del Efecto de los distintos tipos de Fibras en el comportamiento Post Fisura del Hormigón Reforzado con Fibras. Rodríguez Lozano, José Juan Segura Vicent, Julio 2013.
- Comportamiento mecánico a escala real de un piso industrial de Hormigón Reforzado con Fibras Sintéticas. Paolo Chioma Valenzuela, Gerente Técnico EPC.
- Estado Normativo Actual a Nivel Nacional y Europeo, Aplicaciones Estructurales del Hormigón con Fibras en Edificación. DR. Ingeniero Albert de la Fuente Antequera, Junio 2013.
- Nuevo método de prueba para determinar la Resistencia a Tracción indirecta de concreto reforzado con Fibra empleando el ensayo de Doble Punzonamiento. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco 2014.
- Desarrollo e implementación de un Hormigón reforzado con Fibras Sintéticas para la repavimentación de la ruta 24 de Uruguay. Universidad Nacional del Sur, Noviembre 2012.
- Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con Fibras de Acero. Julián Carrillo, William Aperador, Giovanni González, Septiembre 2013.
- Concreto reforzado con fibras y concreto lanzado: Nuevos métodos de ensaye (Primera Parte). M. Eng. M. Sc. Alessandro D'Amico, Julio 2012.
- Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona). Sergio Carmona, Antonio Aguado, Climent Molins, Manuel Cabrera, Julio 2009.
- Ensayos para la caracterización y control de Shotcrete reforzado con fibras – Uso del ensayo Barcelona como alternativa para el control de HRF. Sergio Carmona, Agosto 2014.

ANEXOS.

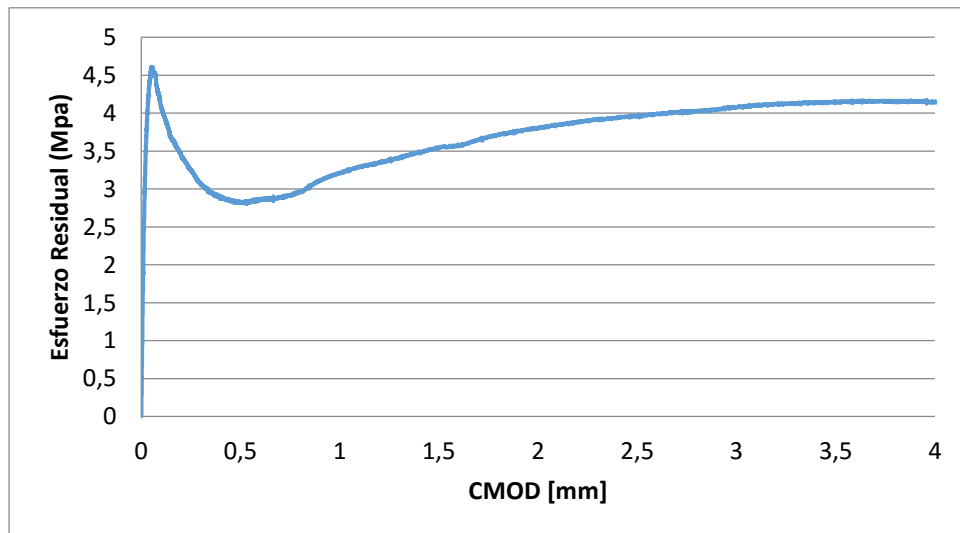
Anexo: Resultados ensayos EN-14651 dosificación 8 [kg/m³].

Anexo 1: Resultados Probeta 1

Carga máxima [kN].	14,397	Desplazamiento total [mm].	7,003
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,058	Carga en el desplazamiento total [kN].	11,454



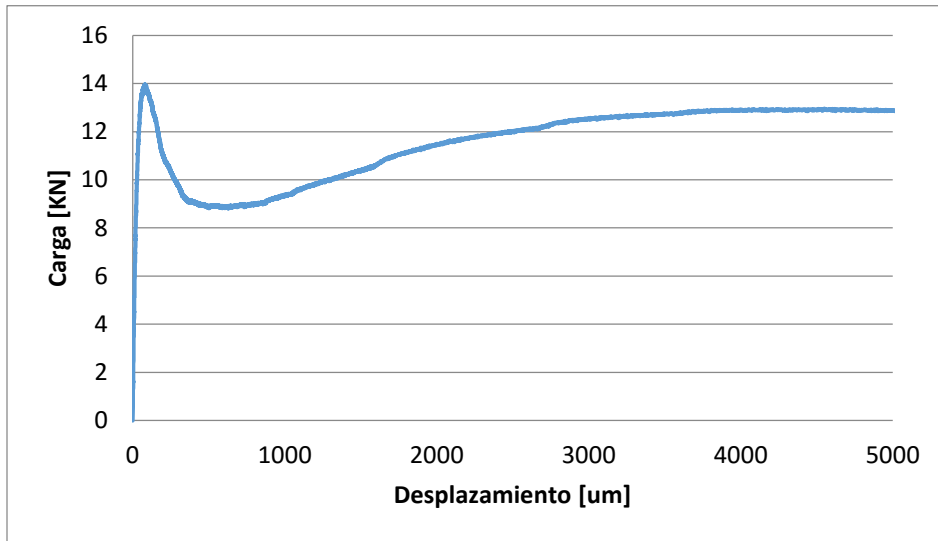
Anexo 2: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 1.



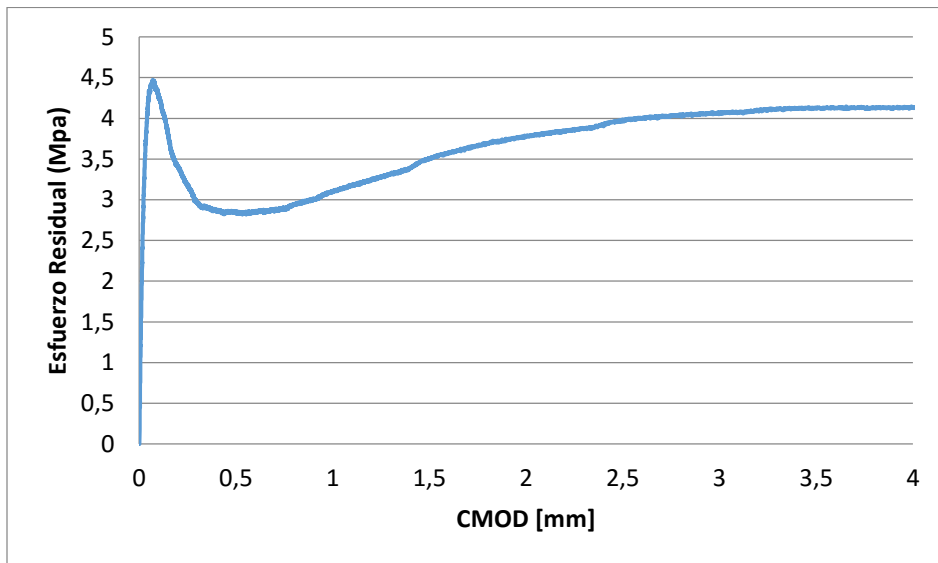
Anexo 3: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 1.

Anexo 4: Resultados Probeta 2

Carga máxima [kN].	13,959	Desplazamiento total [mm].	5,313
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,079	Carga en el desplazamiento total [kN].	12,816



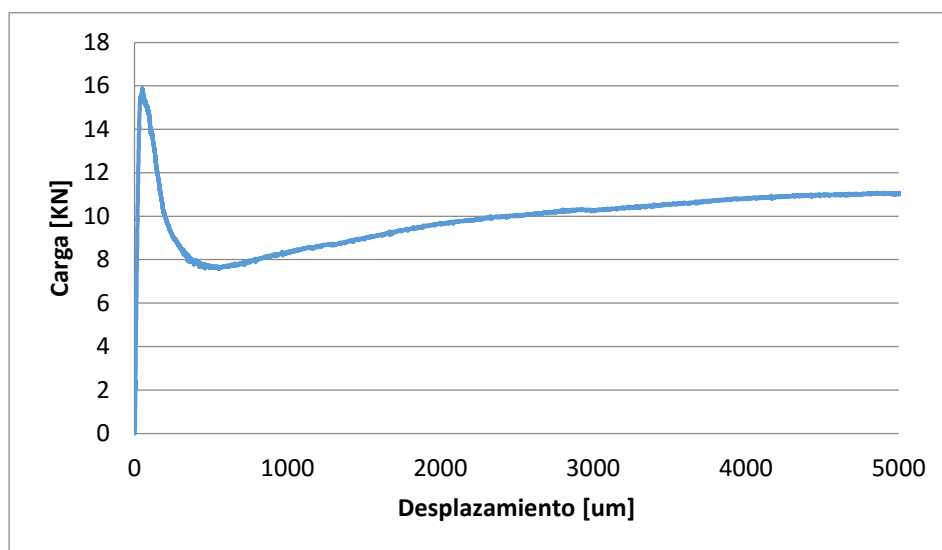
Anexo 5: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 2.



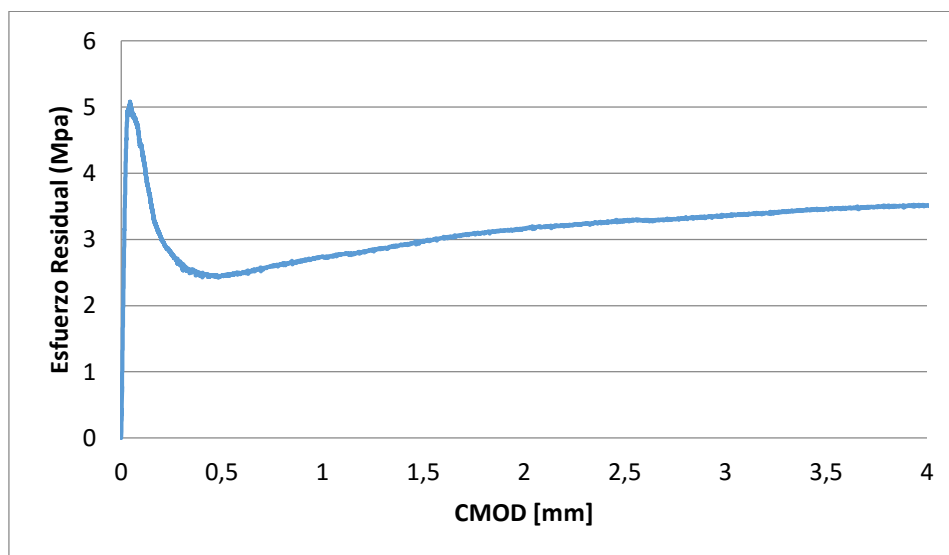
Anexo 6: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 2.

Anexo 7: Resultados Probeta 3.

Carga máxima [kN].	15,880	Desplazamiento total [mm].	6,129
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,050	Carga en el desplazamiento total [kN].	10,996



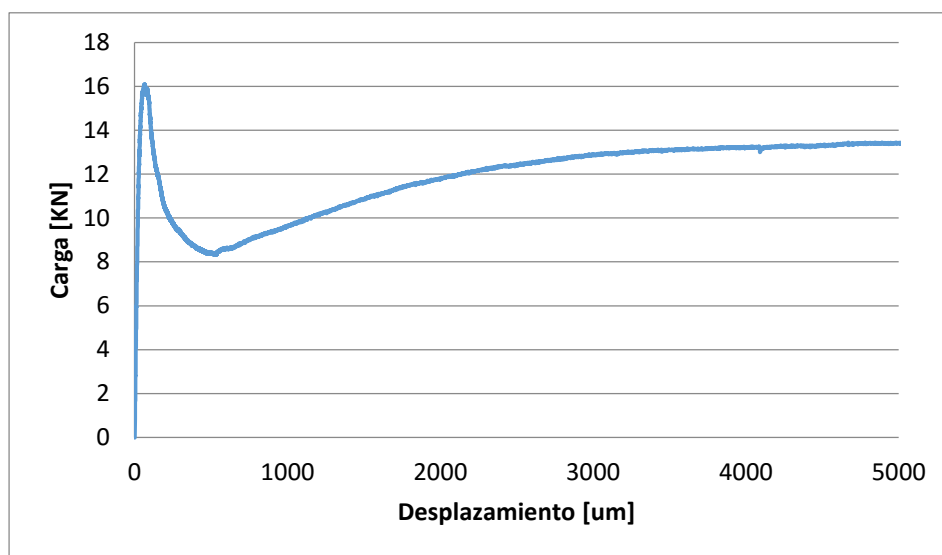
Anexo 8: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 3.



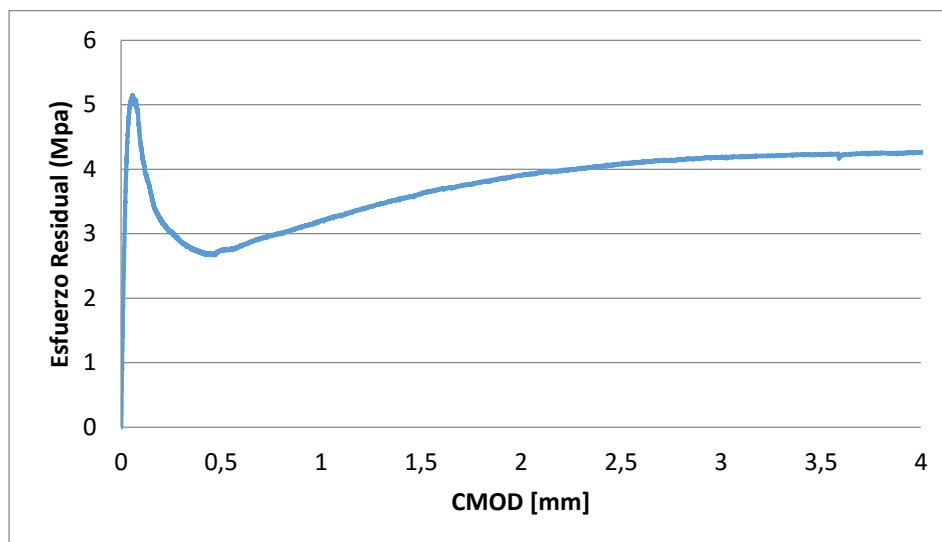
Anexo 9: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 3.

Anexo 10: Resultados Probeta 4

Carga máxima [kN].	16,097	Desplazamiento total [mm].	5,174
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,065	Carga en el desplazamiento total [kN].	13,402



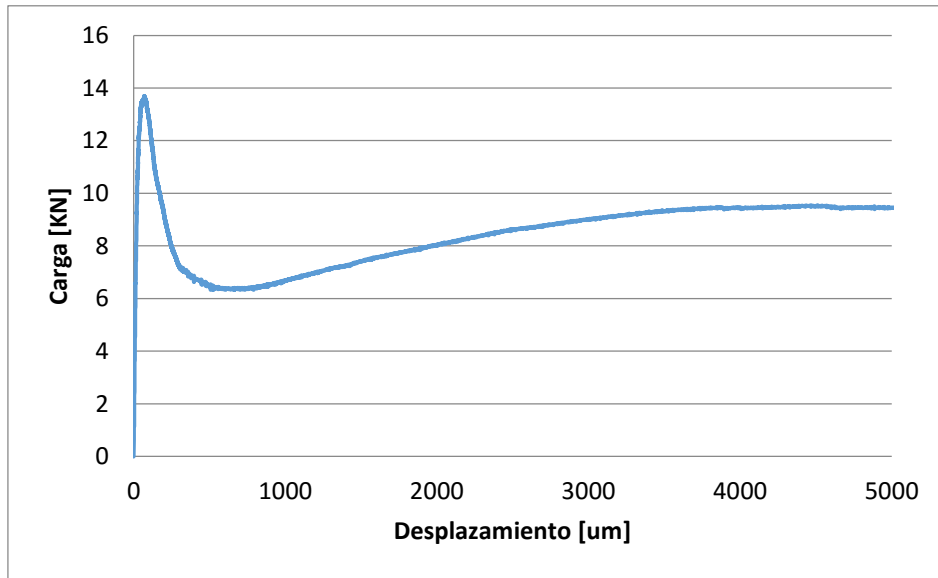
Anexo 11: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 4.



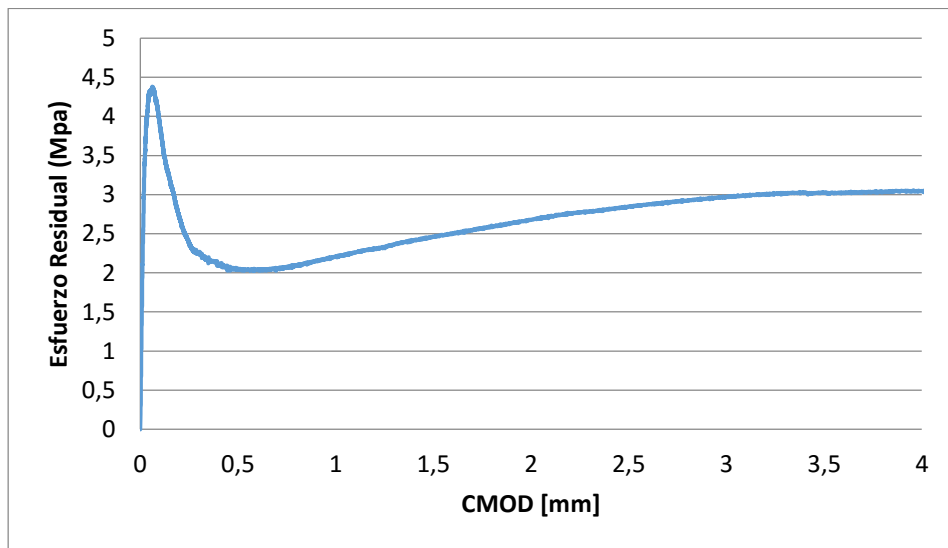
Anexo 12: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 4.

Anexo 13: Resultados Probeta 5.

Carga máxima [kN].	13,686	Desplazamiento total [mm].	5,020
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,069	Carga en el desplazamiento total [kN].	9,446



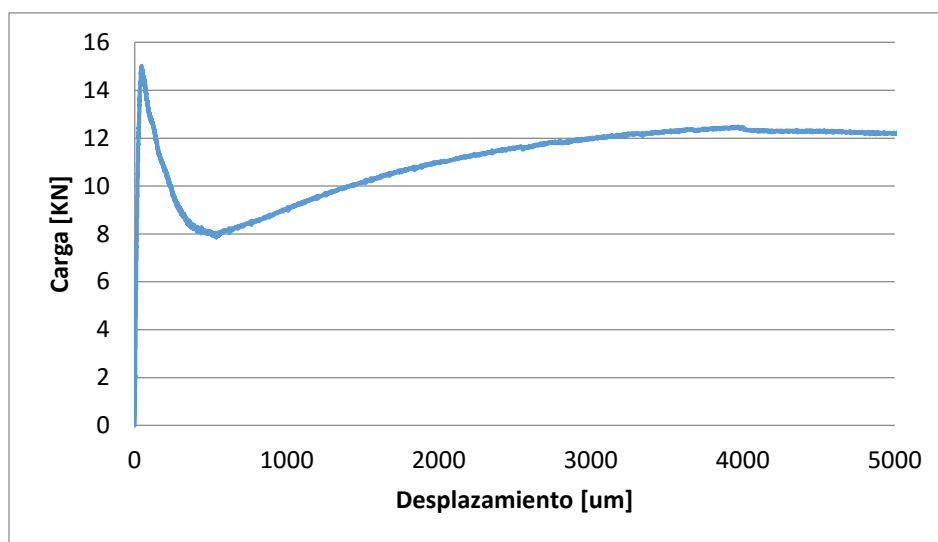
Anexo 14: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 5.



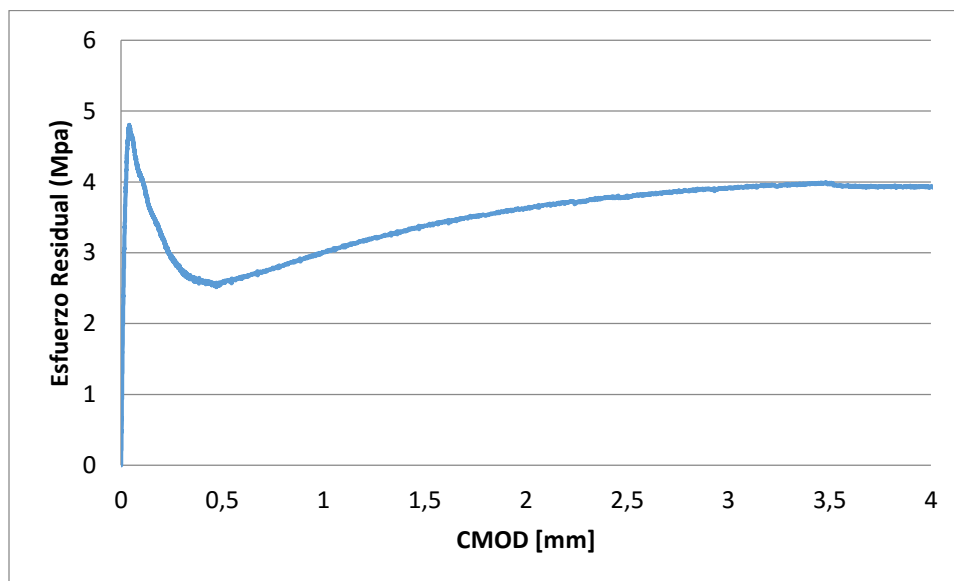
Anexo 15: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 5.

Anexo 16: Resultados Probeta 6.

Carga máxima [kN].	15,016	Desplazamiento total [mm].	5,033
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,045	Carga en el desplazamiento total [kN].	12,211



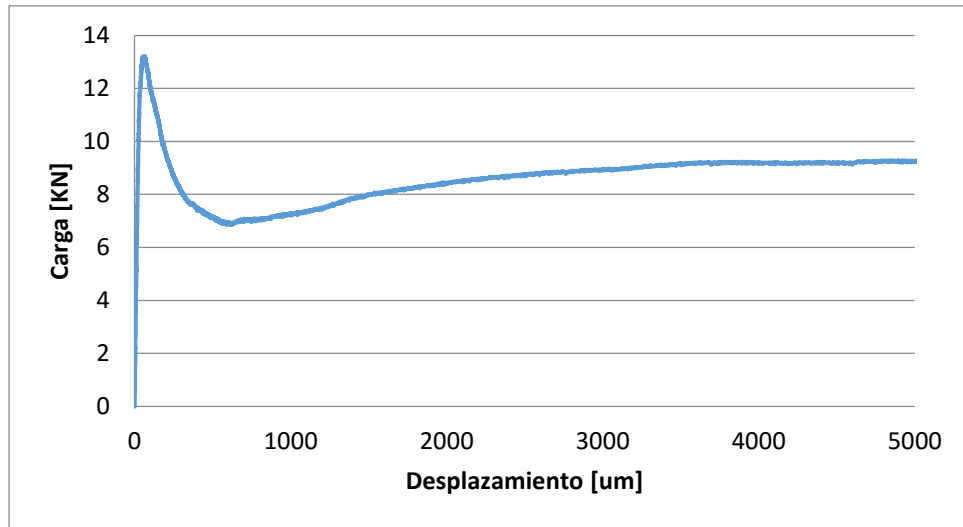
Anexo 17: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 6.



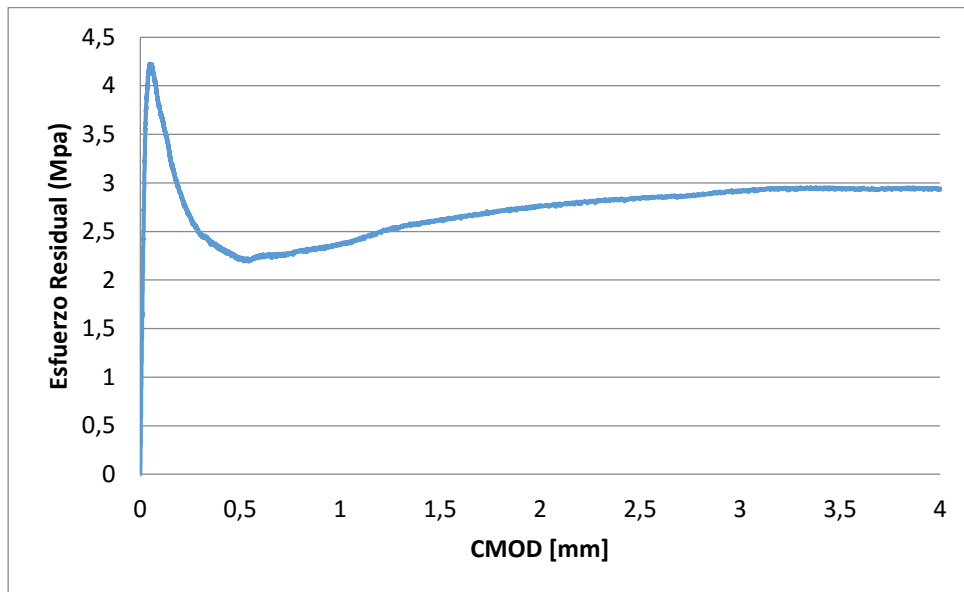
Anexo 18: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 6.

Anexo 19: Resultados Probeta 7.

Carga máxima [kN].	13,207	Desplazamiento total [mm].	6,725
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,054	Carga en el desplazamiento total [kN].	8,842



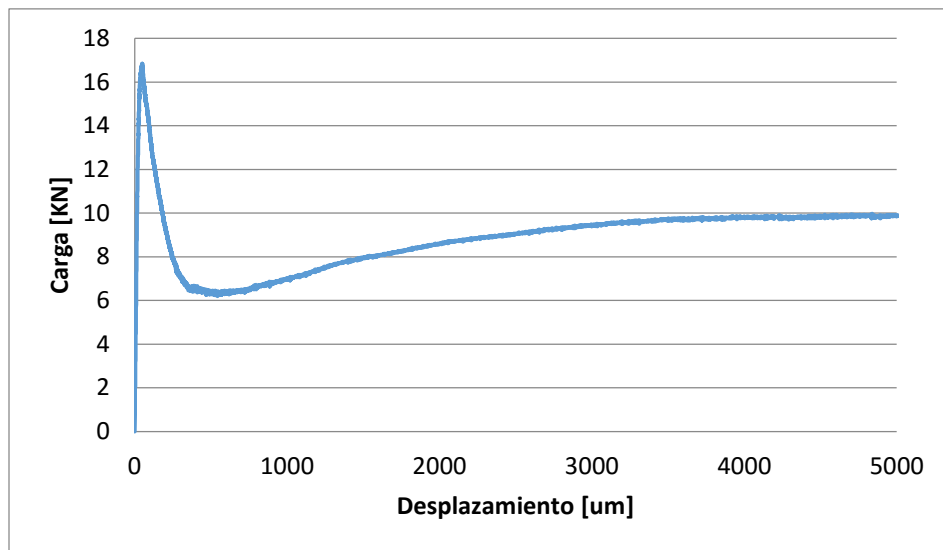
Anexo 20: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 7.



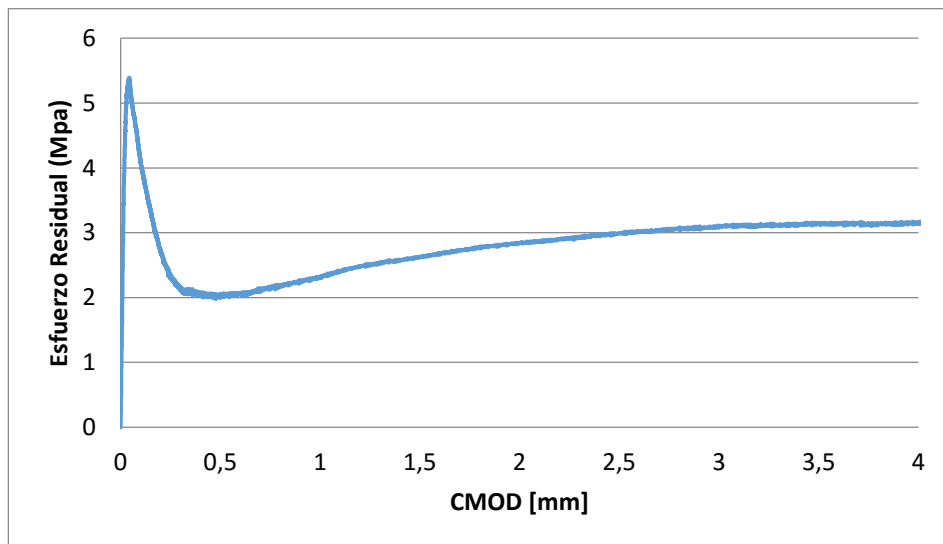
Anexo 21: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 7.

Anexo 22: Resultados Probeta 8.

Carga máxima [kN].	16,845	Desplazamiento total [mm].	5,197
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,050	Carga en el desplazamiento total [kN].	9,926



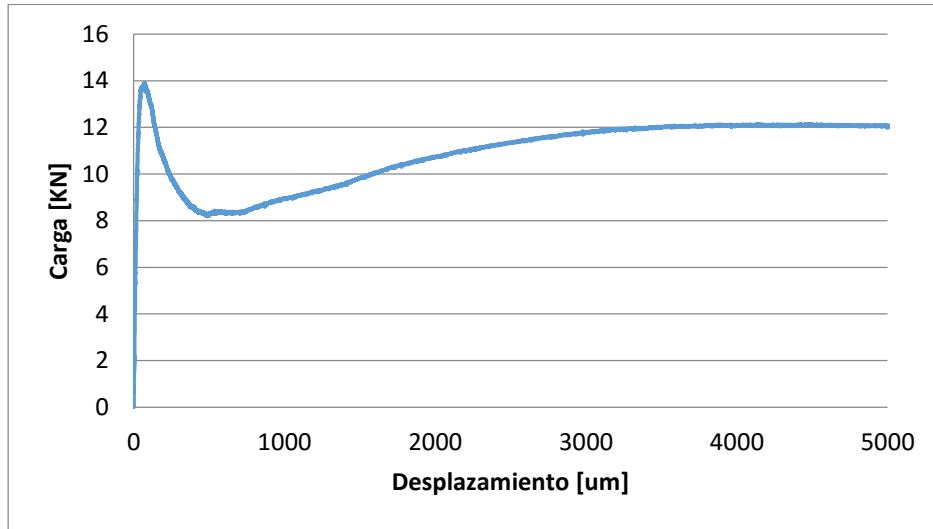
Anexo 23: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 8.



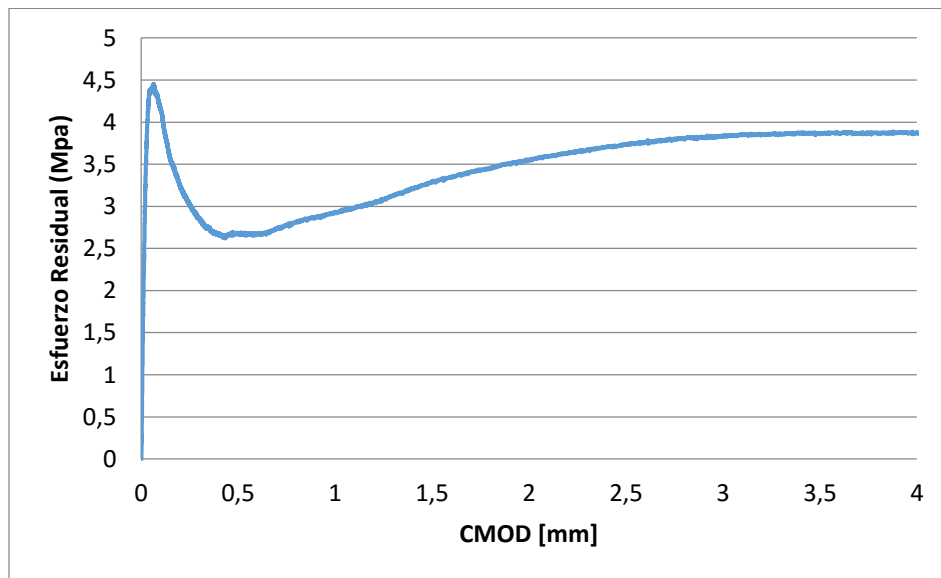
Anexo 24: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 8.

Anexo 25: Resultados Probeta 9.

Carga máxima [kN].	13,911	Desplazamiento total [mm].	5,042
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,072	Carga en el desplazamiento total [kN].	12,042



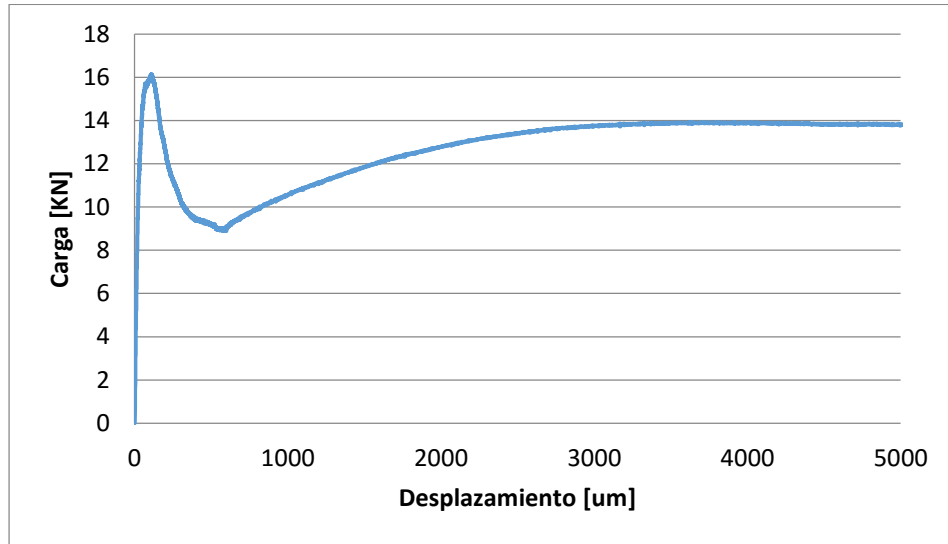
Anexo 26: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 9.



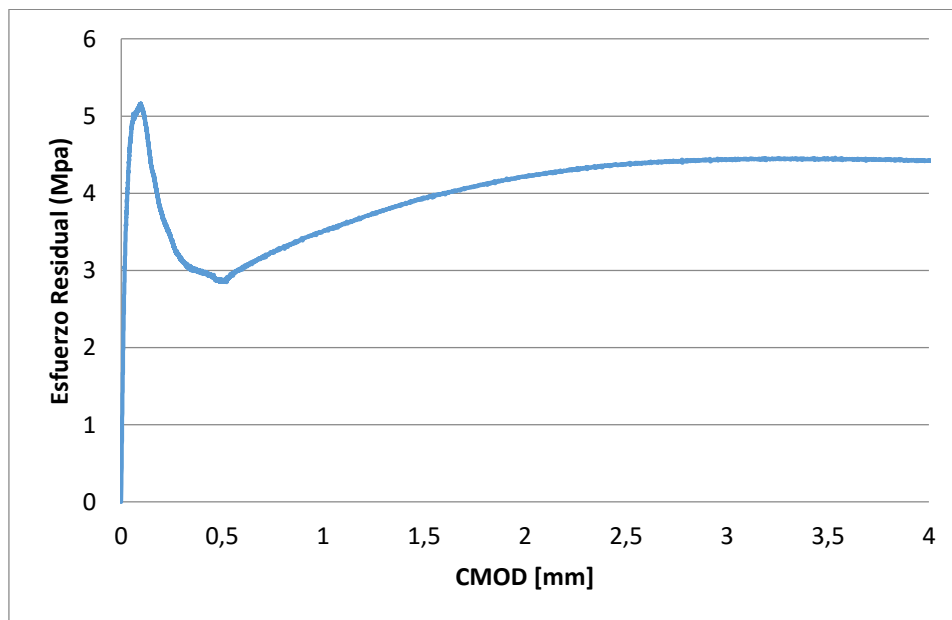
Anexo 27: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 9.

Anexo 28: Resultados Probeta 10.

Carga máxima [kN].	16,130	Desplazamiento total [mm].	5,034
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,111	Carga en el desplazamiento total [kN].	13,775



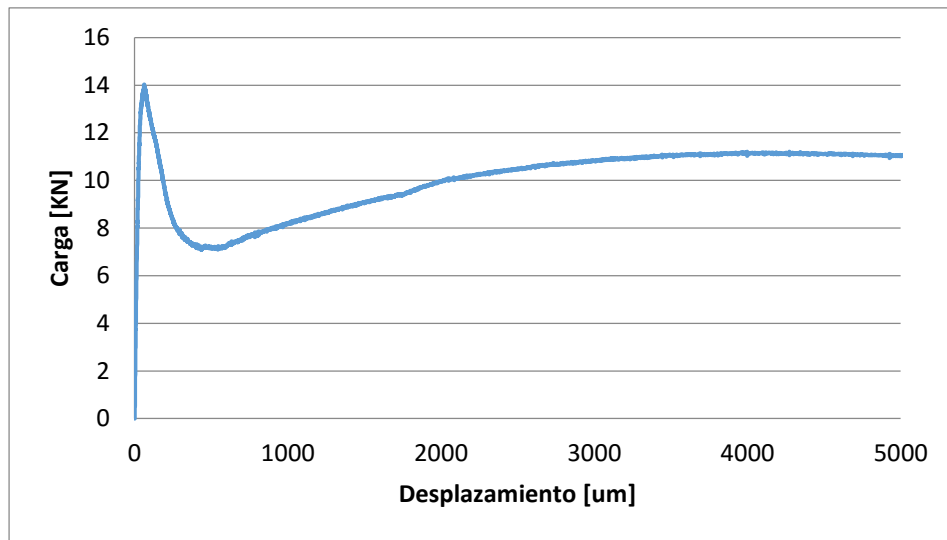
Anexo 29: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 10.



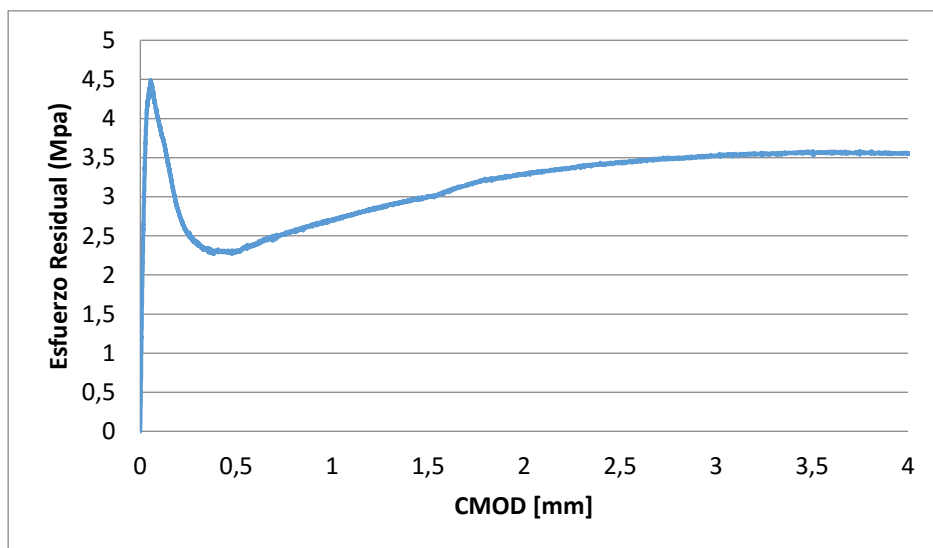
Anexo 30: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 10.

Anexo 31: Resultados Probeta 11.

Carga máxima [kN].	14,031	Desplazamiento total [mm].	5,228
Desplazamiento en carga máxima [mm].	0,062	Carga en el desplazamiento total [kN].	10,974



Anexo 32: Grafica carga v/s Desplazamiento Probeta 11.



Anexo 33: Resistencia Residual v/s CMOD. Probeta 11.

Anexo 34: Cargas según Lop y CMOD. Dosificación 8 kg/m³.

CARGAS según distintos valores de Lop y CMOD en [KN].					
PROBETA	Lop	0,5	1,5	2,5	3,5
Probeta 1	14,376	8,838	11,049	12,398	12,927
Probeta 2	13,546	8,893	10,961	12,393	12,878
Probeta 3	15,697	7,66	9,311	10,24	10,808
Probeta 4	15,805	8,562	11,302	12,774	13,195
Probeta 5	13,376	6,375	7,687	8,897	9,439
Probeta 6	14,543	8,031	10,564	11,887	12,452
Probeta 7	13,186	6,932	8,171	8,877	9,194
Probeta 8	16,250	6,373	8,198	9,351	9,82
Probeta 9	13,652	8,398	10,283	11,687	12,046
Probeta 10	14,939	8,996	12,295	13,651	13,927
Probeta 11	13,708	7,203	9,403	10,738	11,175
PROMEDIO	14,462	7,842	9,929	11,172	11,624

Anexo 35: Resistencias Residuales según Lop y CMOD. Dosificación 8 kg/m³.

RESISTENCIAS RESIDUALES en [MPa] según distintos valores de Lop y CMOD.					
PROBETA	Lop	0,5	1,5	2,5	3,5
Probeta 1	4,600	2,828	3,536	3,967	4,137
Probeta 2	4,335	2,846	3,508	3,966	4,121
Probeta 3	5,022	2,451	2,980	3,277	3,459
Probeta 4	5,058	2,740	3,617	4,088	4,222
Probeta 5	4,280	2,040	2,460	2,847	3,020
Probeta 6	4,654	2,570	3,380	3,804	3,985
Probeta 7	4,220	2,218	2,615	2,841	2,942
Probeta 8	5,200	2,039	2,623	2,992	3,142
Probeta 9	4,369	2,687	3,291	3,740	3,855
Probeta 10	4,780	2,879	3,934	4,368	4,457
Probeta 11	4,387	2,305	3,009	3,436	3,576
PROMEDIO	4,628	2,509	3,177	3,575	3,720
Desviación	0,345	0,318	0,476	0,529	0,523
F_{jk}	4,060	1,986	2,395	2,705	2,859
	f_{R1k}	f_{R1k}	f_{R2k}	f_{R3k}	f_{R4k}

Anexo: Datos según ensayo EN-14651 dosificación 4 [kg/m³].

Anexo 36: Cargas según Lop y CMOD. Dosificación 4 kg/m³.

CARGAS según distintos valores de Lop y CMOD en [kN].					
PROBETA	Lop	0,5	1,5	2,5	3,5
Probeta 1	12,138	2,156	2,445	2,863	3,028
Probeta 2	12,146	3,158	3,544	3,911	4,112
Probeta 3	12,674	4,108	4,959	5,655	5,869
Probeta 4	15,424	5,019	5,183	5,36	5,334
Probeta 5	7,685	2,667	2,7	2,891	2,9
Probeta 6	15,331	5,021	4,971	5,187	5,12
PROMEDIO	12,566	3,688	3,967	4,311	4,394

Anexo 37: Resistencias Residuales según Lop y CMOD. Dosificación 4 kg/m³.

RESISTENCIAS RESIDUALES en [MPa] según distintos valores de Lop y CMOD.					
PROBETA	Lop	0,5	1,5	2,5	3,5
Probeta 1	3,884	0,690	0,782	0,916	0,969
Probeta 2	3,887	1,011	1,134	1,252	1,316
Probeta 3	4,056	1,315	1,587	1,810	1,878
Probeta 4	4,936	1,606	1,659	1,715	1,707
Probeta 5	4,906	1,607	1,591	1,660	1,638
Probeta 6	2,459	0,853	0,864	0,925	0,928
PROMEDIO	4,021	1,180	1,269	1,380	1,406
Desviación	0,905	0,389	0,394	0,403	0,399
F_{jk}	2,532	0,540	0,622	0,716	0,750
	f_{R1,k}	f_{R1,k}	f_{R2,k}	f_{R3,k}	f_{R4,k}

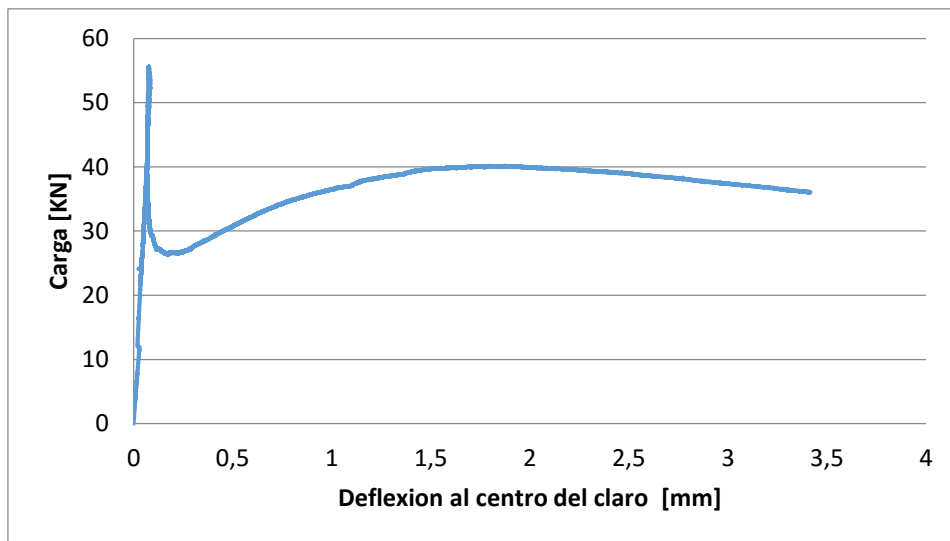
Anexo 38: Caracterización para Fibra Estructural, Dosificación 4 kg/m³.

FIBRA ESTRUCTURAL 4 [kg/m³]		
F1k/FLK	0,213 >0,4	No Cumple
F3k/F1k	1,325 >0,5	Cumple

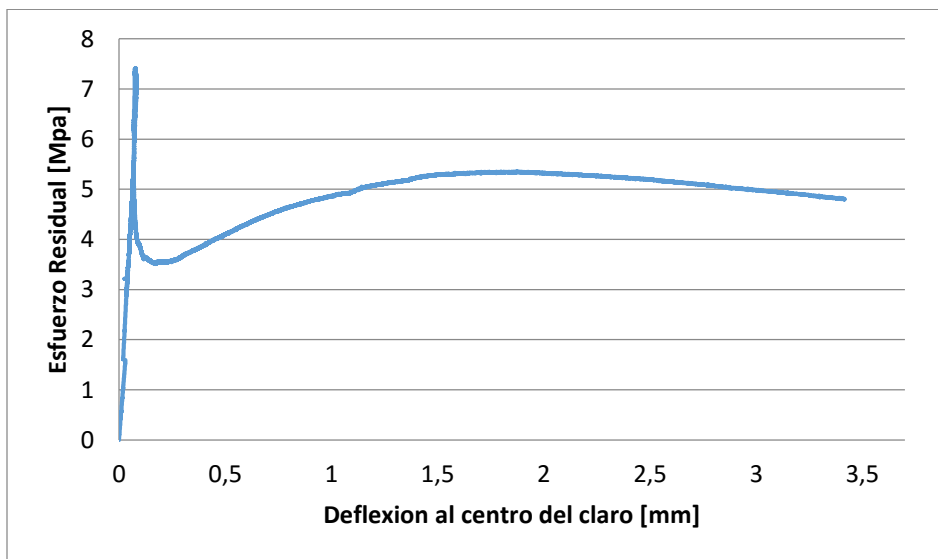
Anexo: Resultados ensayos ASTM C-1609 dosificación 8 [kg/m³].

Anexo 39: Resultados Probeta 1.

Carga máxima [kN].	55,634	Desplazamiento Flecha total [mm].	3,256
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,073	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	36,062



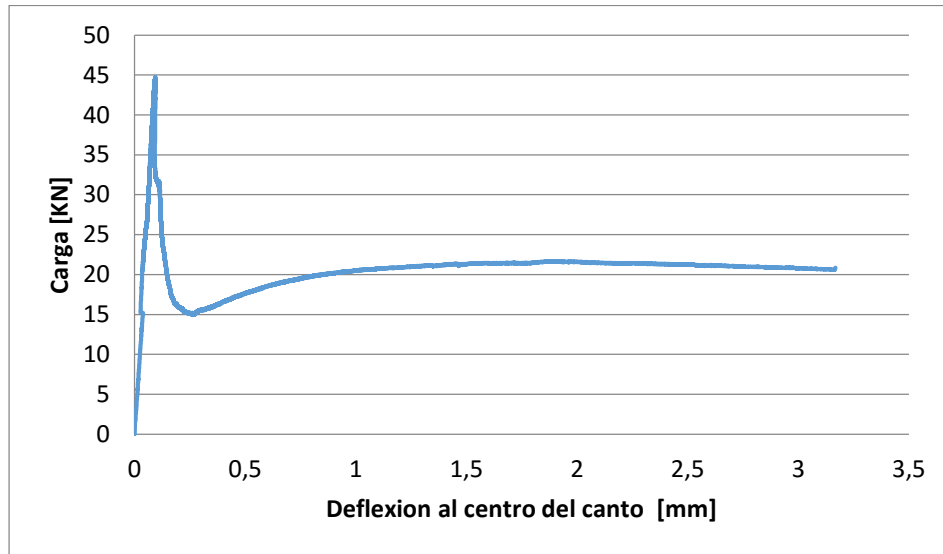
Anexo 40: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 1.



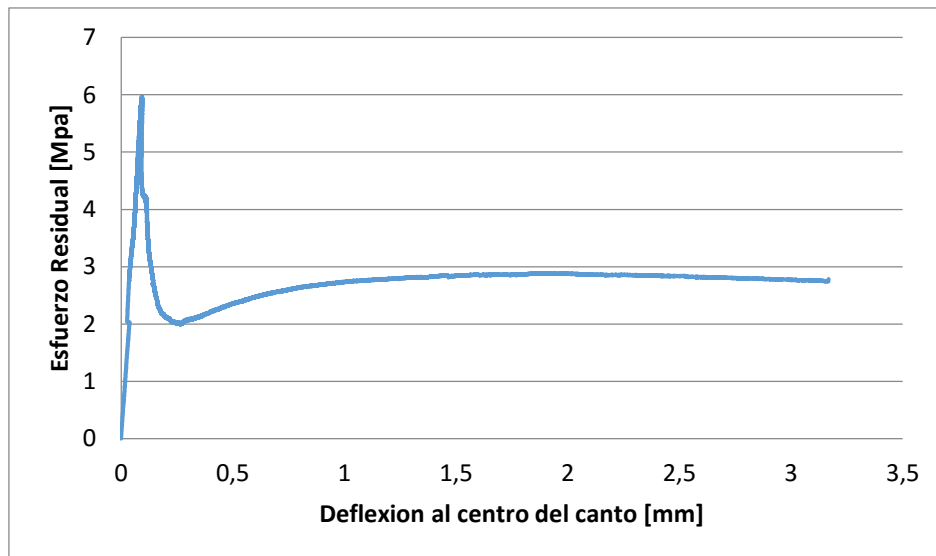
Anexo 41: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 1.

Anexo 42: Resultados Probeta 2.

Carga máxima [kN].	44,722	Desplazamiento Flecha total [mm].	2,682
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,079	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	20,863



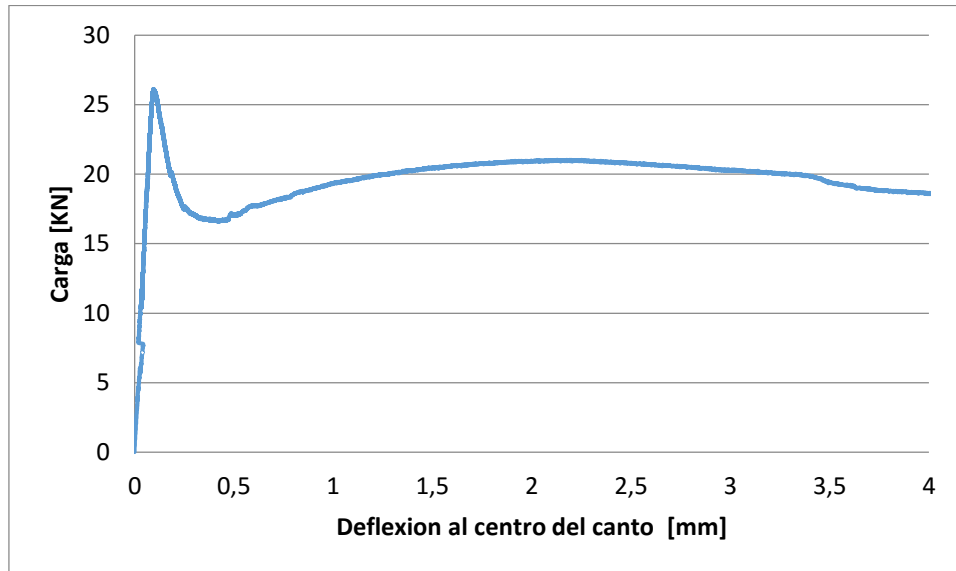
Anexo 43: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 2.



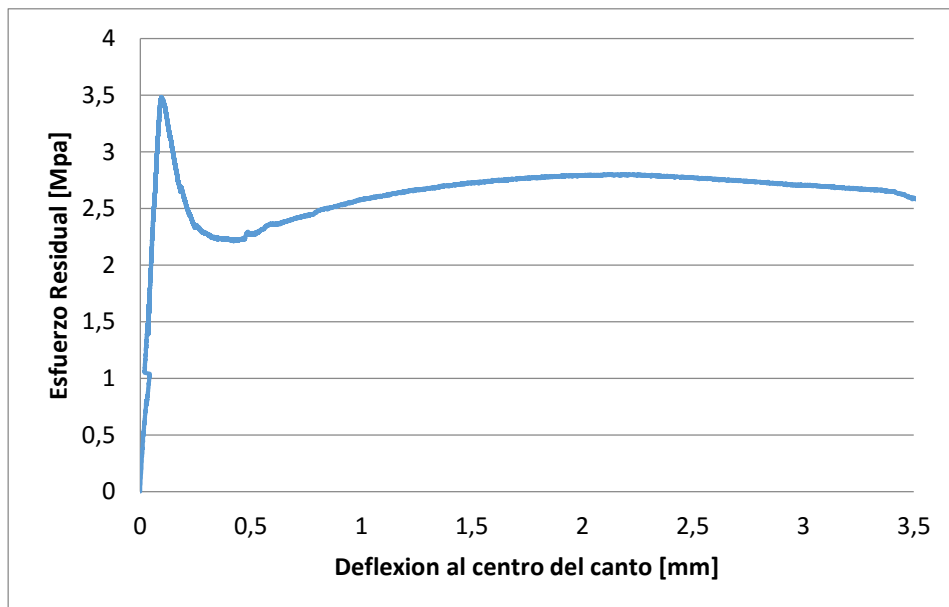
Anexo 44: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 2.

Anexo 45: Resultados Probeta 3.

Carga máxima [kN].	26,121	Desplazamiento Flecha total [mm].	7,371
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,084	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	7,565



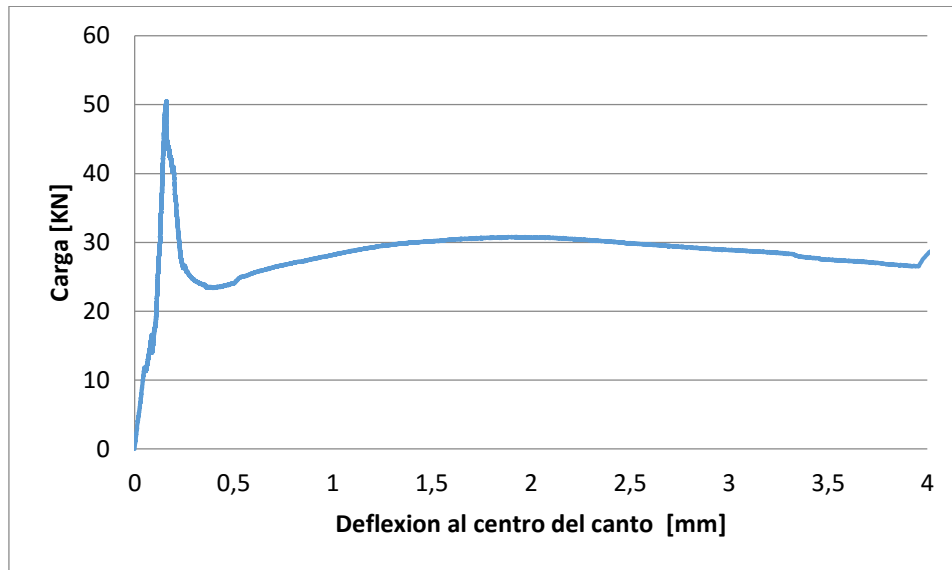
Anexo 46: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 3.



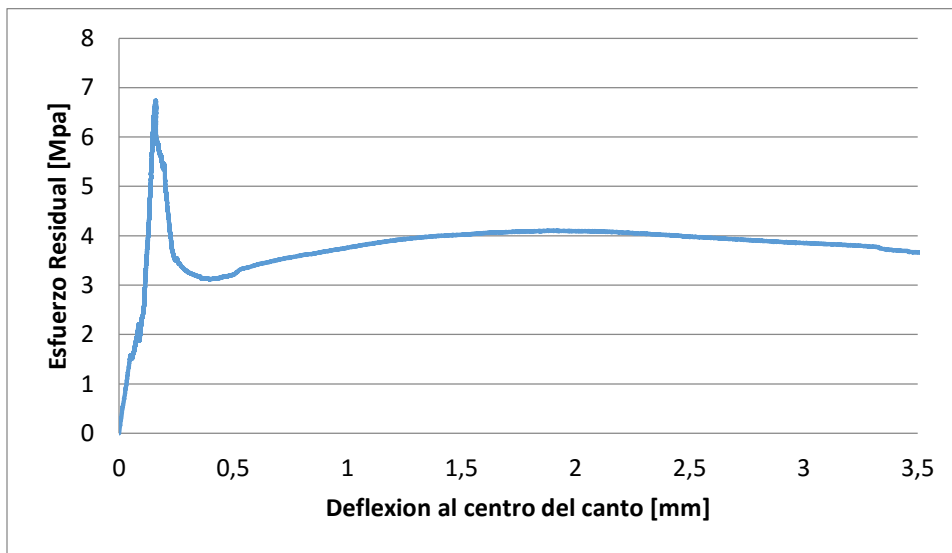
Anexo 47: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 3.

Anexo 48: Resultados Probeta 4.

Carga máxima [kN].	50,523	Desplazamiento Flecha total [mm].	6,423
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,157	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	24,366



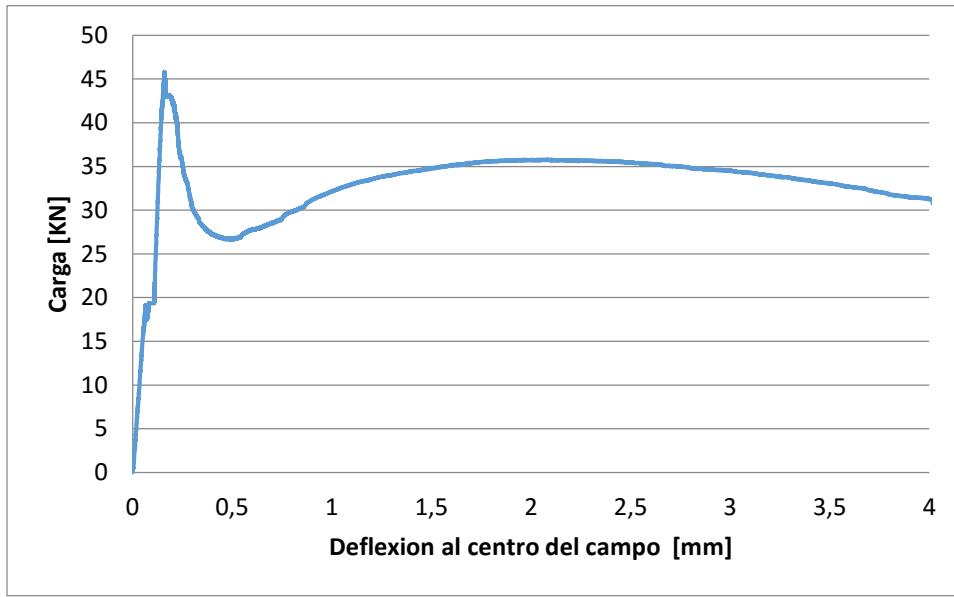
Anexo 48: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 4.



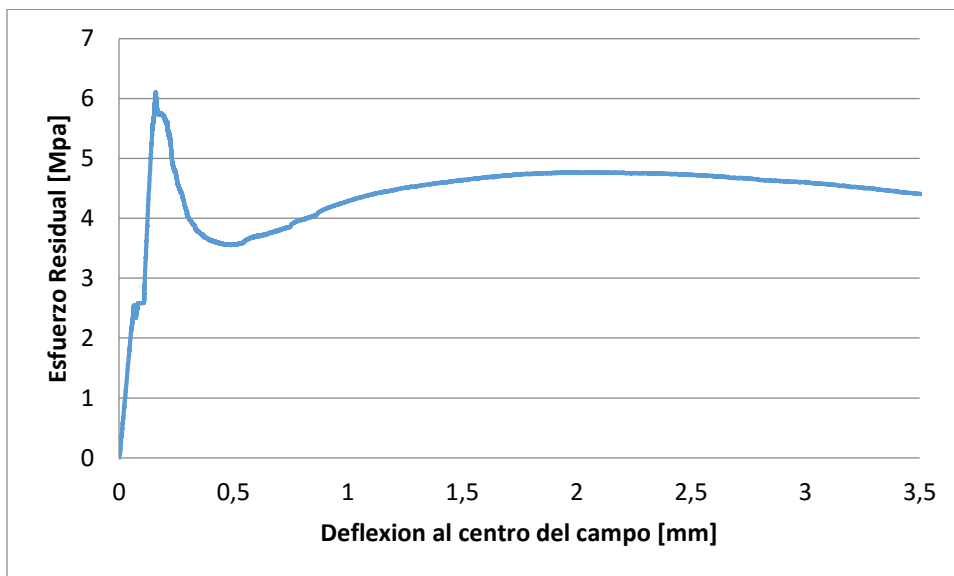
Anexo 49: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 4.

Anexo 50: Resultados Probeta 5.

Carga máxima [kN].	45,777	Desplazamiento Flecha total [mm].	4,124
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,146	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	33,857



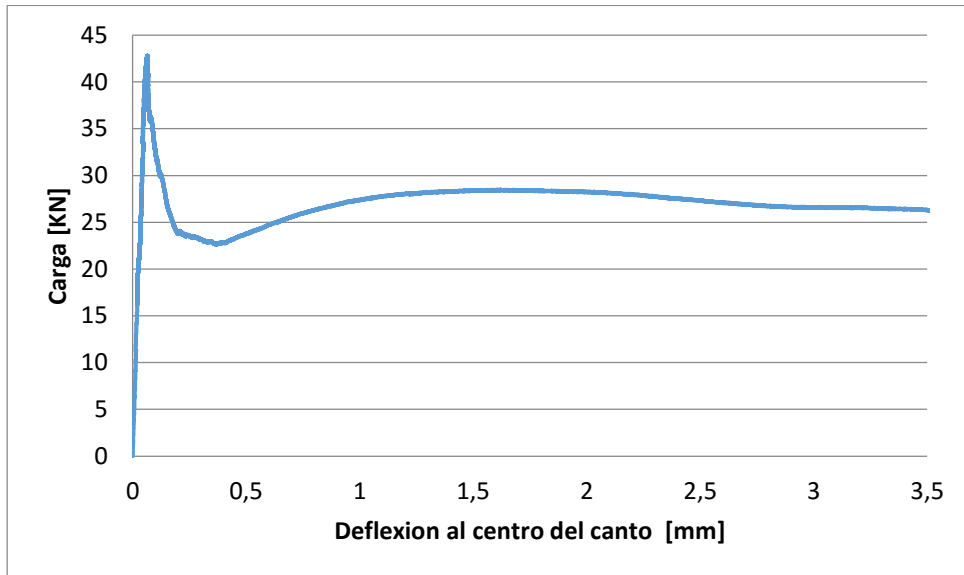
Anexo 51: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 5.



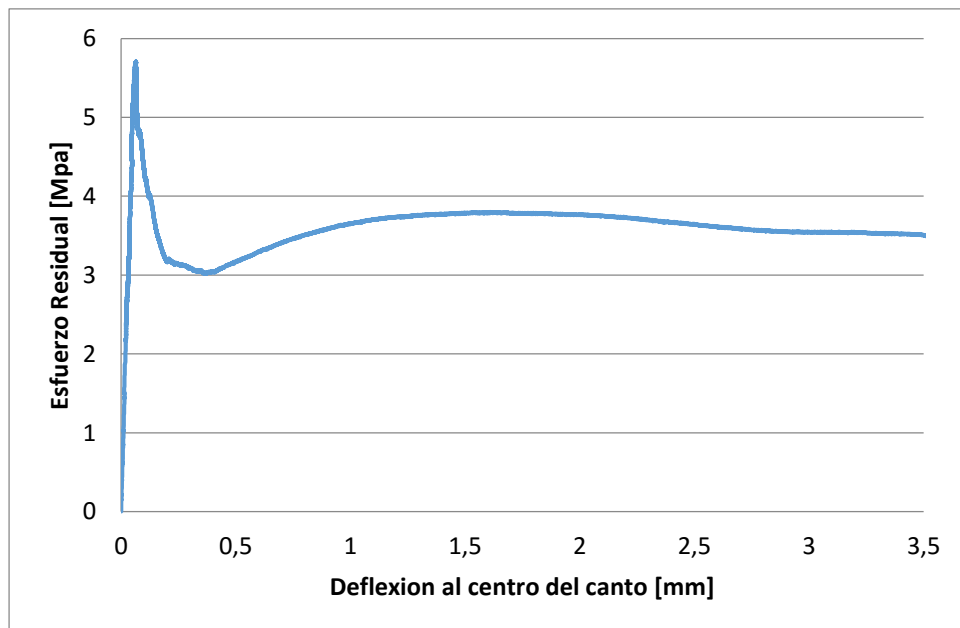
Anexo 52: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 5.

Anexo 53: Resultados Probeta 6.

Carga máxima [kN].	42,804	Desplazamiento Flecha total [mm].	5,650
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,064	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	29,762



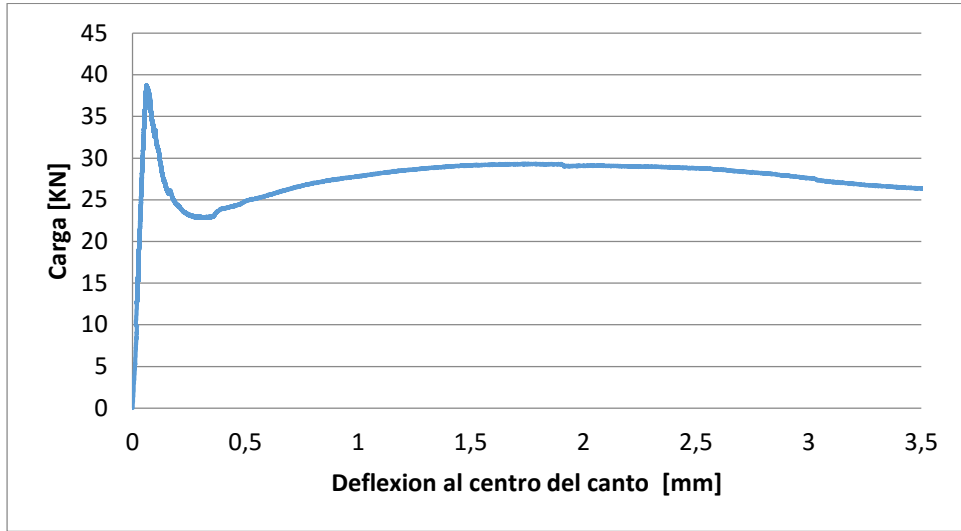
Anexo 54: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 6.



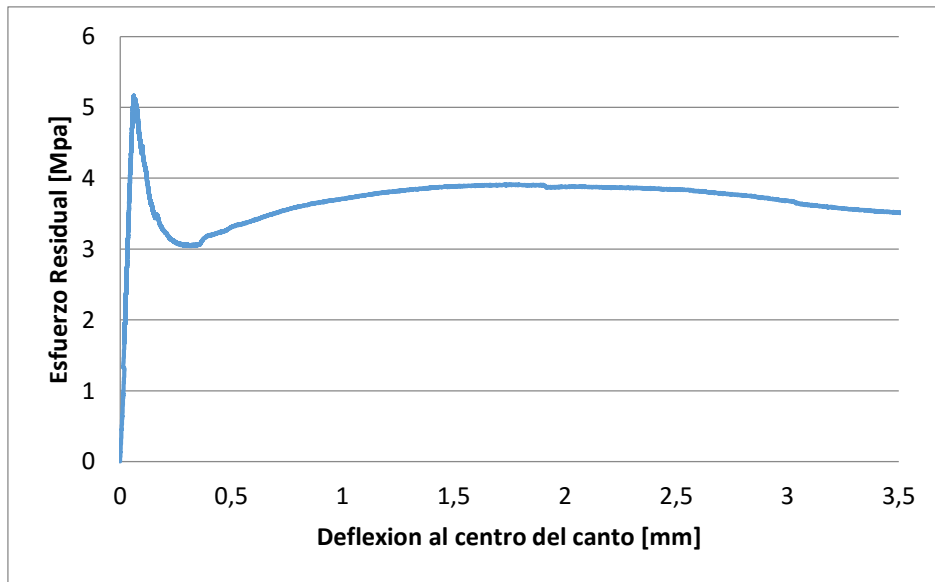
Anexo 55: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 6.

Anexo 56: Resultados Probeta 7.

Carga máxima [kN].	38,739	Desplazamiento Flecha total [mm].	6,503
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,054	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	19,793



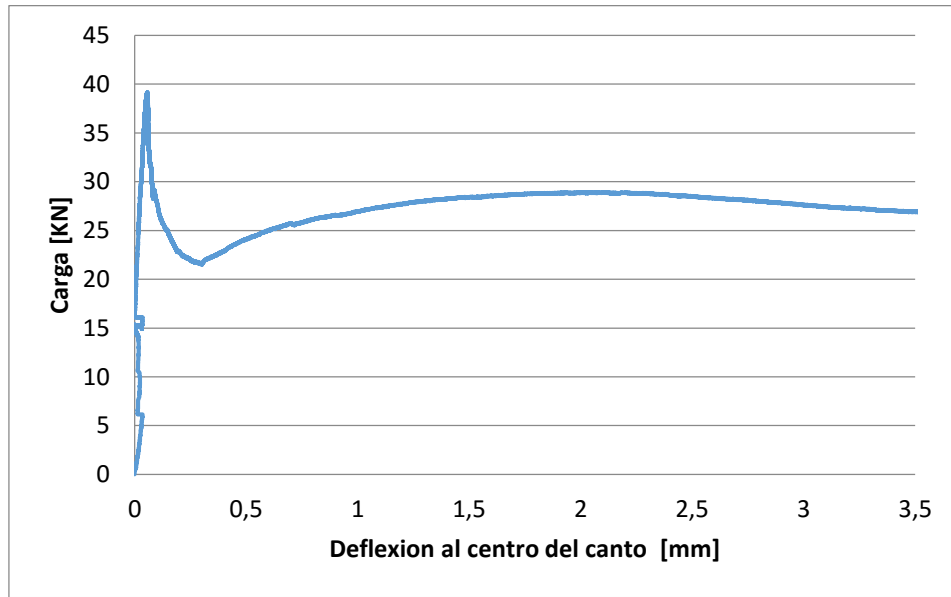
Anexo 57: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 7.



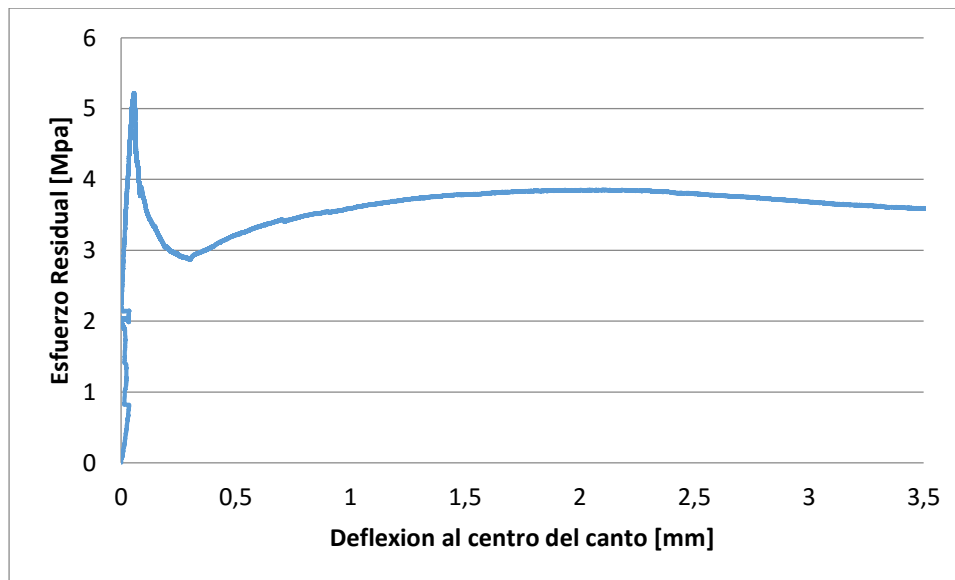
Anexo 58: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 7.

Anexo 59: Resultados Probeta 8.

Carga máxima [kN].	39,158	Desplazamiento Flecha total [mm].	6,864
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,045	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	14,604



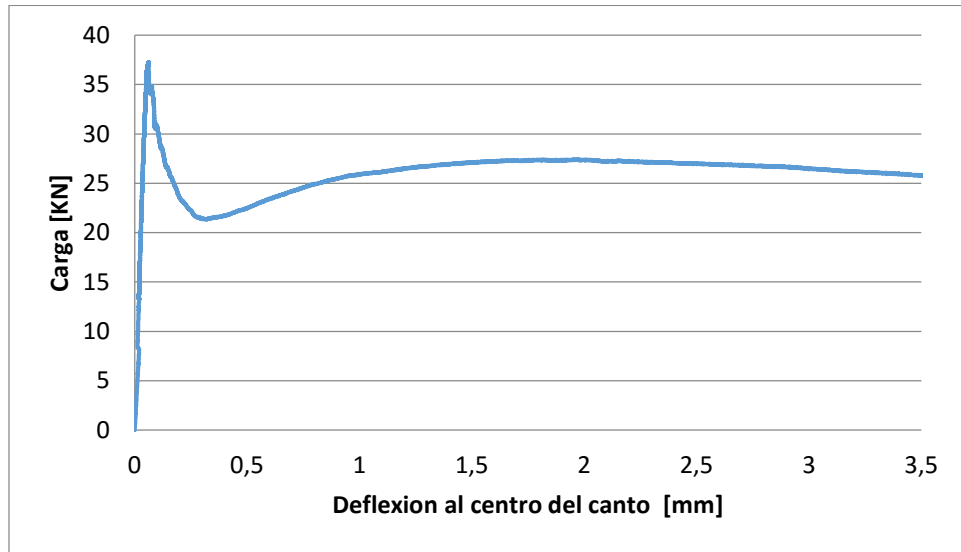
Anexo 60: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 8.



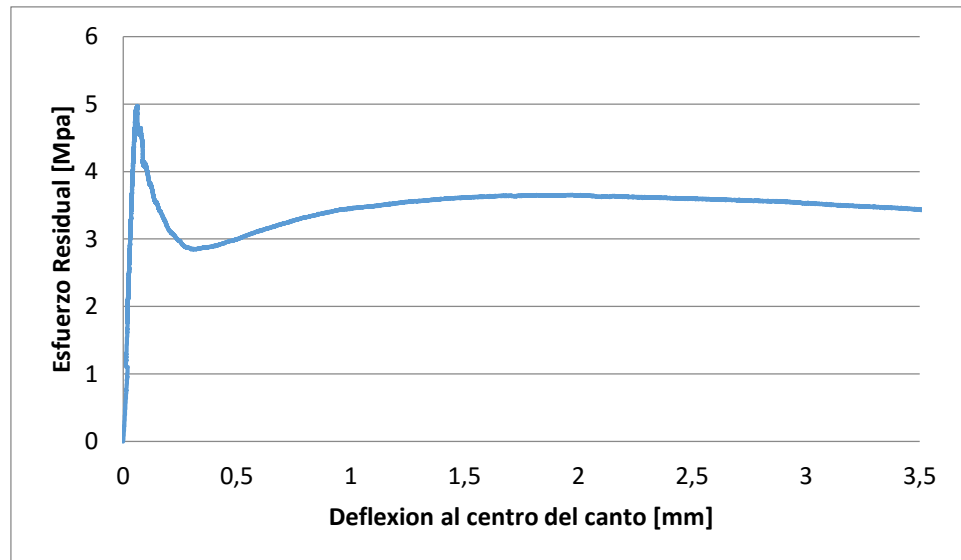
Anexo 61: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 8.

Anexo 62: Resultados Probeta 9.

Carga máxima [kN].	37,275	Desplazamiento Flecha total [mm].	4,790
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,054	Carga en el desplazamiento Flecha total [kN].	31,269



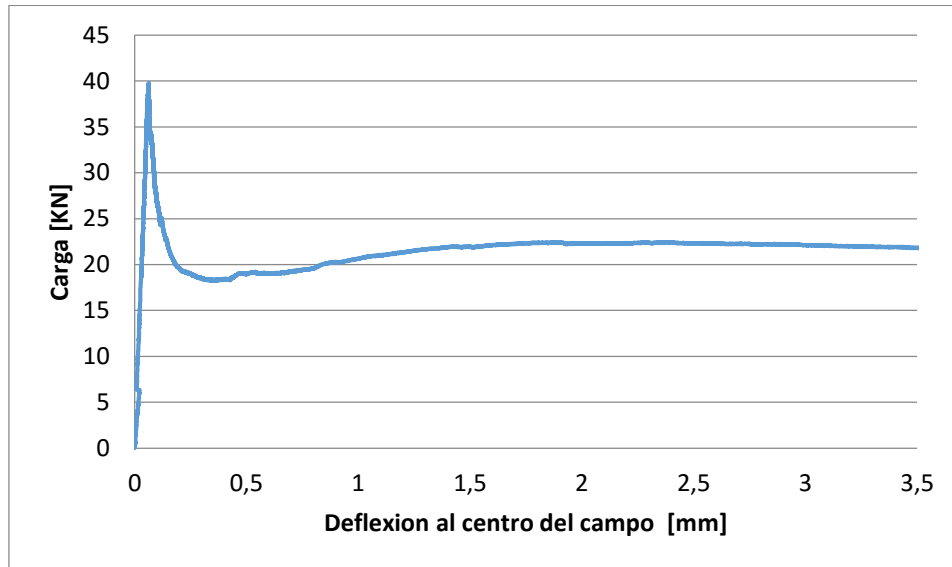
Anexo 63: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 9.



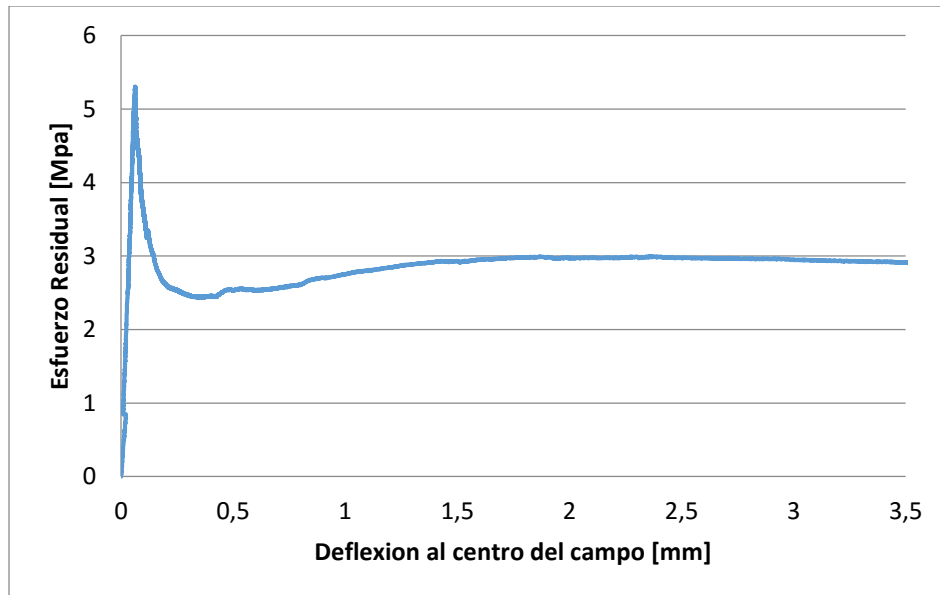
Anexo 64: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 9.

Anexo 65: Resultados Probeta 10.

Carga máxima [KN].	39,764	Desplazamiento Flecha total [mm].	7,245
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,064	Carga en el desplazamiento Flecha total [KN].	4,371



Anexo 66: Grafica carga v/s Flecha. Probeta 10.



Anexo 67: Resistencia Residual v/s Flecha. Probeta 10.

Anexo 68: Cargas según L/600 y L/150. Dosificación 8 kg/m³.

CARGAS en [kN] según deflexion en L/600 y L/150		
PROBETA	0,75	3
Probeta 1	34,278	37,313
Probeta 2	19,521	20,769
Probeta 3	18,303	20,263
Probeta 4	26,698	28,866
Probeta 5	29,049	34,533
Probeta 6	25,973	26,626
Probeta 7	26,675	27,619
Probeta 8	25,814	27,607
Probeta 9	24,541	26,432
Probeta 10	19,444	22,139
PROMEDIO	25,030	27,217

Anexo 69: Resistencias Residuales según L/600 y L/150. Dosificación 8 kg/m³.

RESISTENCIAS RESIDUALES en [Mpa] según deflexion en L/600 y L/150						
PROBETA	0,75 [mm]	3 [mm]	Tenacidad	RDT₁₅₀	R_{peak}	RDT₁₅₀/R_{peak}
Probeta 1	4,570	4,975	103,350	4,593	7,418	0,619
Probeta 2	2,603	2,769	52,014	2,312	5,963	0,388
Probeta 3	2,440	2,702	52,497	2,333	3,483	0,670
Probeta 4	3,560	3,849	83,941	3,731	6,736	0,554
Probeta 5	3,873	4,604	89,159	3,963	6,104	0,649
Probeta 6	3,463	3,550	79,460	3,532	5,707	0,619
Probeta 7	3,557	3,683	73,503	3,267	5,165	0,632
Probeta 8	3,442	3,681	64,884	2,884	5,221	0,552
Probeta 9	3,272	3,524	68,131	3,028	4,970	0,609
Probeta 10	2,593	2,952	58,656	2,607	5,302	0,492
PROMEDIO	3,337	3,629	72,559	3,225	5,607	0,578

Anexo: Datos según ensayo ASTM C-1609 dosificación 4 [kg/m³].

Anexo 70: Cargas según L/600 y L/150. Dosificación 4 kg/m³.

CARGA en [KN] según deflexión en L/600 y L/150		
PROBETA	0,75	3
Probeta 1	10,127	11,311
Probeta 2	19,132	20,916
Probeta 3	9,847	10,627
Probeta 4	9,057	9,607
Probeta 5	9,858	11,911
PROMEDIO	11,604	12,874

Anexo 68: Resistencias Residuales según L/600 y L/150. Dosificación 4 kg/m³.

RESISTENCIA RESIDUAL en [Mpa] según deflexion en L/600 y L/150						
PROBETA	0,75 [mm]	3 [mm]	Tenacidad	RDT₁₅₀	R_{peak}	RDT₁₅₀/R_{peak}
Probeta 1	1,350	1,508	32,479	1,444	5,960	0,242
Probeta 2	2,551	2,789	51,338	2,282	5,564	0,410
Probeta 3	1,313	1,417	30,675	1,363	4,814	0,283
Probeta 4	1,208	1,281	28,907	1,285	3,842	0,334
Probeta 5	1,314	1,588	16,013	0,712	4,089	0,174
PROMEDIO	1,547	1,717	31,882	1,417	4,854	0,289