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

CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES REFORZADOS CON CUANTÍAS BAJAS DE FIBRAS SINTÉTICAS.

ALVARO HERRERA OLIVARES

Memoria para Optar al Título de
Constructor Civil

Profesor Guía
Sergio Carmona Malatesta

Mayo del 2017

AGRADECIEMIENTOS

En primer lugar agradecer a mi madre Marcela por todos los valores que me entrego ya que mi primera escuela fue ella y la persona que soy hoy en día es gracias a ti mamá, en segundo lugar agradezco a mi padre Guillermo, quien de pequeño me ha enseñado el rubro y el esfuerzo que hay que realizar para salir adelante.

A mi hermano Diego por apoyarme y darme animo siempre, a mis abuelos y familia en general.

DEDICATORIA

A mi familia,

Todo esto es posible

Por su gran esfuerzo.

RESUMEN

En la actualidad, se entiende que los Hormigones de Cemento Portland son materiales que pueden adoptar diferentes tipos de formas, además tienen un muy buen comportamiento a la compresión debido a sus propiedades soportantes. Por otro lado, las estructuras de hormigón se consideran como elementos muy rígidos, este grado de rigidez provoca que sea un material frágil debido a la baja resistencia que poseen a la tracción.

Es por tanto que se genera la necesidad de buscar nuevas tecnologías que al incorporarse al hormigón mejoren sus propiedades. En efecto, la idea es mejorar sus capacidades soportantes y a su vez mejorar el comportamiento de otros tipos de esfuerzos como a la tracción y flexión. El propósito de todo esto es generar elementos de hormigón al menor valor posible, permitiendo abaratar costos en la elaboración de proyectos sin descuidar la calidad de estos.

Dentro de estas nuevas tecnologías se encuentra el *Hormigón Reforzado con Fibras* (**HRF**) que incorpora fibras a la mezcla de hormigón. El trabajo de las fibras es el de imitar el comportamiento de la armadura en acero, por lo tanto, va a generar que el hormigón tenga un mejor comportamiento ante los esfuerzos de Flexotracción debido a que la fibra genera una resistencia residual que es la que se contrapone a los esfuerzos a los que está siendo sometido el hormigón.

El principal objetivo de los hormigones con adiciones de fibra es *mejorar el comportamiento post fisuracion* ya que la fibras absorben un porcentaje de la energía, a la cual se expone el hormigón, generando una resistencia residual que permite al hormigón aguantar mayores deformaciones y, mejorando el desempeño en comparación a hormigones sin refuerzos de fibra.

El objetivo de esta memoria *es "Caracterizar las propiedades de hormigones con bajas cuantías de fibras sintéticas"*. Para cumplir este objetivo se moldearán probetas para determinar la Tenacidad y Resistencias Residuales según los procedimientos expuestos en las normas EN 14651 y ASTM C 1609. Esta investigación se enmarca en el desarrollo del Proyecto Fondecyt N°1150881.

Los resultados obtenidos para la norma ASTM C1609 son los siguientes:

- La Carga en L/600 máxima es de 11,530 [KN], la mínima es de 6,884 [KN] y Promedio 9,349 [KN].
- La Carga en L/150 máxima es de 15,466 [KN], la mínima es de 7,410 [KN] y Promedio 10,748 [KN].
- La Resistencia Residual en L/600 máxima es de 1,537 [MPa], la mínima es de 0,918 [MPa] y Promedio 1,247 [MPa].
- La Resistencia Residual en L/150 máxima es de 2,062 [MPa], la mínima es de 0,988 [MPa] y Promedio 1,433 [MPa].
- La Tenacidad en L/150 máxima es de 38,577 [Joule], la mínima es de 21,341 [Joule] y Promedio 29,673 [Joule].
- La Resistencia Residual Equivalente [RDT_{150}] máxima es de 1,715 [MPa], la mínima es de 0,983 [MPa] y Promedio 1,319 [MPa]

Finalmente los resultados de la norma europea son los siguientes:

- La Carga con un CMOD 0,5 [mm] máxima es de 5,021 [KN], la mínima es de 2,156 [KN] y Promedio 3,762 [KN].
- La Carga con un CMOD 1,5 [mm] máxima es de 5,183 [KN], la mínima es de 2,495 [KN] y Promedio 3,910 [KN].
- La Carga con un CMOD 2,5 [mm] máxima es de 5,655 [KN], la mínima es de 2,849 [KN] y Promedio 4,202 [KN].
- La Carga con un CMOD 3,5 [mm] máxima es de 5,869 [KN], la mínima es de 2,844 [KN] y Promedio 4,310 [KN].
- La Resistencia Residual con un CMOD 0,5 [mm] máxima es de 1,607 [MPa], la mínima es de 0,690 [MPa] y Promedio 1,204 [MPa].
- La Resistencia Residual con un CMOD 1,5 [mm] máxima es de 1,659 [MPa], la mínima es de 0,798 [MPa] y Promedio 1,251 [MPa].
- La Resistencia Residual con un CMOD 2,5 [mm] máxima es de 1,810 [MPa], la mínima es de 0,912 [MPa] y Promedio 1,345 [MPa].
- La Resistencia Residual con un CMOD 3,5 [mm] máxima es de 1,878 [MPa], la mínima es de 0,910 [MPa] y Promedio 1,379 [MPa].

ABSTRACT

At present, it is understood that Portland cement concretes are materials that can adopt different types of forms, in addition they have a good behavior to the compression due to its supporting properties. On the other hand, concrete structures are considered as very rigid elements, this degree of rigidity causes the sea a fragile material due to the low resistance that have a traction.

It is therefore the need to seek new technologies that incorporate concrete to improve their properties. In effect, the idea is to improve their supporting capacities and in turn improve the behavior of other types of efforts such as traction and flexion. The purpose of all this is to generate concrete elements at the lowest possible value, allow the costs in the preparation of projects without neglecting the quality of these.

Within these new technologies is Reinforced Concrete with Fibers (HRF) that incorporates the fibers into the concrete mix. The work of the fibers is to imitate the behavior of the reinforcement in steel, therefore, a generator goes that the concrete has a better behavior before the bending stresses because the fiber generates a residual resistance that is the one that is It counteracts the stress to which the concrete is being subjected.

The main objective of the concrete with additions of the fiber is to improve the behavior after the cracking since the fibers absorb a percentage of the power, to which the concrete is exposed, generating a residual resistance that allows the concrete to withstand greater deformations and, Improving performance compared to non-fiber reinforced concrete.

The purpose of this report is to "Characterize the properties of concretes with lows and amounts of synthetic fibers". To meet this objective, test pieces are molded to determine Tenacity and Residual Resistance according to the procedures set out in standards EN 14651 and ASTM C 1609. This research is part of the development of the Fondecyt project N ° 1150881.

The results obtained for ASTM C1609 are as follows:

- The Load in L / 600 is 11,530 [KN], the minimum is 6,884 [KN] and Average 9,349 [KN].
- The load in L / 150 maximum is 15,466 [KN], the minimum load is 7,410 [KN] and Average 10,748 [KN].
- The Residual Strength at L / 600 is 1.537 [MPa], the minimum is 0.918 [MPa] and Average 1.247 [MPa].
- The Residual Strength in L / 150 is maximum of 2,062 [MPa], the minimum is of 0.988 [MPa] and Average 1,433 [MPa].
- The tenacity in L / 150 maximum is 38,577 [Joule], the minimum is 21,341 [Joule] and Average 29,673 [Joule].
- Maximum Residential Resistance [RDT150] is 1,715 [MPa], the minimum is 0.983 [MPa] and Average 1,319 [MPa]

Finally, the results of the European standard are as follows:

- The Load with a CMOD of 0.5 [mm] maximum is 5,021 [KN], the minimum is 2,156 [KN] and Average of 3,762 [KN].
- The Load with a maximum CMOD 1.5 [mm] is 5.183 [KN], the minimum is 2.495 [KN] and Average 3.910 [KN].
- The Load with a maximum CMOD 2,5 [mm] is 5,655 [KN], the minimum is 2,849 [KN] and Average 4,202 [KN].
- The Load with a maximum CMOD 3,5 [mm] is 5,869 [KN], the minimum is 2,844 [KN] and Average 4,310 [KN].
- Residual Resistance with a CMOD of 0.5 [mm] maximum is 1.607 [MPa], the minimum is 0.690 [MPa] and Average 1.204 [MPa].
- Residual Resistance with a maximum CMOD 1.5 [mm] is 1.659 [MPa], the minimum is 0.798 [MPa] and Average 1.251 [MPa].
- Residual Strength with a maximum CMOD 2,5 [mm] is 1,810 [MPa], the minimum is 0.912 [MPa] and Average 1,345 [MPa].
- The Residual Resistance with a maximum CMOD 3.5 [mm] is 1.878 [MPa], the minimum is 0.910 [MPa] and Average 1.379 [MPa].

GLOSARIO

- **Abrazadera:** Elemento instalado en la parte inferior de las probetas prismáticas con el fin de sujetar el transductor lector de desplazamientos.

- **Flexotracción:** 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.

- **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 puntal 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 (Crack Mouth Opening Displacement):** Desplazamiento de apertura de la boca de la fisura.

- **Flecha:** Desplazamiento lineal, medido por un transductor instalado sobre un prisma sometido a una carga puntual centrada F.

INDICE

Contenido

AGRADECIEMIENTOS 2
DEDICATORIA 3
RESUMEN 4
ABSTRACT 6
GLOSARIO 8
INTRODUCCIÓN 12
Capítulo 1. MARCO TEÓRICO 15
I. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF) 15
II. TIPOS DE FIBRAS PARA HORMIGONES 17
II.1. Fibras de Acero 17
II.2. Fibras de Vidrio 17
II.3. Fibras Naturales 18
II.4. Fibras de Polipropileno 19
III. INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN Y LA CONCENTRACIÓN DE LA FIBRA 20
IV. APLICACIONES SEGÚN EL TIPO DE FIBRA 20
V. RECOMENDACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS IN SITU 21
VI. RECOMENDACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE FIBRAS EN LOS HORMIGONES PROYECTADOS 22
VII. COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LOS HORMIGONES FIBROREFORZADOS EN ESTADO ENDURECIDO 23
I. El Comportamiento a la Compresión 23
II. El Comportamiento al Corte y la Torsión. 23
III. El Comportamiento a la Flexotracción. 23
VIII. NORMAS 24
I. ENSAYO NORMA ASTM C 1609 24
II. ENSAYO A LA FLEXOTRACCIÓN SEGÚN LA NORMA EN-14651 28
Capítulo 2. EXPERIENCIA EN LABORATORIO 33
A. MATERIALES EMPLEADOS 35
1. Áridos 35
2. Cemento 37
3. Aditivo Viscocrete 5100 CL. 38

4. Fibra Sintética EPC Barchip 54 39
B. PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO 41
1. Preparación de materiales y herramientas 41
2. Hormigonado de las probetas 43
3. Curado de las probetas 43
PRIMER ENSAYO: BAJO LA NORMATIVA EN-14651 45
1. Preparación del Equipo de Ensayo 45
2. Ejecución del Ensayo 46
SEGUNDO ENSAYO: BAJO LA NORMATIVA ASTM C-1609 47
1. Preparación del Equipo de Ensayo 47
2. Ejecución del Ensayo 49
Capítulo 3. Resultados 50
Norma ASTM C-1609 50
Norma EN-14651. 56
CONCLUSION 64
REFERENCIAS. 66
Anexo A.1.a 67
Anexo A.1.b 68
Anexo A.2.a 69
Anexo A.2.b 70
Anexo A.3.a 71
Anexo A.3.b 72
Anexo A.4.a 73
Anexo A.4.b 74
Anexo A.5.a 75
Anexo A.5.b 76
Anexo A.6.a 77
Anexo A.6.b 78
Anexo A.7.a 79
Anexo A.7.b 80
Anexo A.8.a 81
Anexo A.8.b 82
Anexo A.9.a 83

Anexo A.9.b 84
Anexo A.10.a 85
Anexo A.10.b 86
Anexo B.1 87
Anexo B.2 88
Anexo B.3 89
Anexo B.4 90
Anexo B.5 91
Anexo B.6 92
Anexo B.7 93
Anexo B.8 94
Anexo B.9 95

Índice Figuras

Figura 01, Curvas típicas de Esfuerzo-Deformación para hormigón reforzado con fibras 16
Figura 02, Situación típica ASTM 24
Figura 03, Muestra la situación típica del ensayo del dispositivo de carga ASTM 25
Figura 04, Curva carga vs flecha para determinar los parámetros de carga residual 26
Figura 05, Situación típica EN-14651 28
Figura 06, Configuración del entalle y carga sobre la probeta (EN-14651) 29
Figura 07, Detalle de Instalación de transductor, placa de aluminio y bastidor (EN-14651) 29
Figura 08, Diagramas de carga-CMOD y FI (EN-14651) 31
Figura 09, Curva carga vs CMOD, indicando CMOD 1, ,2, 3, 4 (EN-14651) 32

Índice Tablas

Tabla 01, Tipos de fibras más comunes y sus propiedades 16
Tabla 02, Propiedades técnicas de las fibras de acero 17
Tabla 03, Propiedades técnicas de las fibras de vidrio 18
Tabla 04, Propiedades técnicas de las fibras de carbón 19
Tabla 05, Propiedades técnicas de las fibras de polipropileno 19
Tabla 06, Dosificación Proyecto Fondecyt N°1150881 33
Tabla 07, Resultados tamizado de la muestra 35
Tabla 08, Resultados Tamizado de la muestra excluyendo el sobre tamaño 36
Tabla 09, Especificaciones cemento Polpaico P400 37
Tabla 10, Propiedades de la Fibra Sintética EPC 40
Tabla 11, Características de la fibra sintética barchip 54 40
Tabla 12, Distribución por cada amasada del HRF 42
Tabla 13, Valores de carga según flecha en L/600 y L/150 52
Tabla 14, Valores de resistencia residual según flecha en L/600 y L/150 52
Tabla 15, Valores Tenacidad en L/150. 53
Tabla 16, Resistencia Residual Equivalente para 4 [kg/m3] 54
Tabla 17, Relación entre la resistencia Peak y resistencia equivalente 54
Tabla 18, Resumen de resultados para 8 [kg/m3] 55
Tabla 19, Valores de Carga para Distintos CMOD (4[kg/m3]) 57
Tabla 20, Valores de Valores de Resistencia Residual para distintos (4[kg/m3]) CMOD 58
Tabla 21, Valores de Carga para Distintos CMOD (8[kg/m3]) 59
Tabla 22, Valores de Valores de Resistencia Residual para distintos (8[kg/m3]) CMOD 60
Tabla 23, Resumen norma ASTM C-1609 (4[kg/m3]) 61
Tabla 23, Resumen norma ASTM C-1609 (8[kg/m3]) 61
Tabla 23, Resumen norma EN-14651(4[kg/m3]) 62
Tabla 23, Resumen norma EN-14651 (8[kg/m3]) 62

Índice Imagen

Imagen 01, Distribución de la fibra en la mezcla ……20
Imagen 02, Ensaye ACTM C 1609 ……34
Imagen 03, Ensaye EN-14651 ……34
Imagen 04, Betonera del laboratorio y los materiales preparados para realizar el hormigonado …42
Imagen 05, Probetas de hormigón durante el proceso de terminación ……..43
Imagen 06, Probetas cubiertas con polietileno (LEMCO 2015) ……44
Imagen 07, Probeta entallada con abrazadera que recibe al transductor……..45
Imagen 08, Probeta instalada según esquema general EN-14651 ……..46
Imagen 09, Aplicación del ensayo EN-14651 ……..47
Imagen 10, Abrazaderas y estructuras del transductor que mide la flecha ……..48
Imagen 11, Aplicación del ensayo ASTM C-1609 ……49

Índice Graficas

Grafica 01, Resumen carga vs Deflexión ensayo ASTM C-1609 (4 [kg/m3]) ……50
Grafica 02, Resumen carga vs Deflexión ensayo ASTM C-1609 (8 [kg/m3]) ……51
Grafica 03, Resistencia Residual VS Flecha fibra sintética 4 [kg/m3] ……53
Grafica 04, Resistencia Residual VS Flecha fibra sintética 8[kg/m3] ……..55
Grafica 05, Resumen de resultados 4[kg/m3], Carga vs CMOD EN-14651 ……56
Grafica 06, Resumen de resultados 8[kg/m3], Carga vs CMOD EN-14651 ……56
Grafica 07, Resistencia Residual vs CMOD fibra sintética 4[kg/m3] ……..58
Grafica 08, Resistencia Residual vs CMOD fibra sintética 8[kg/m3] ……..60

INTRODUCCIÓN

El objetivo general de esta memoria es conocer el comportamiento del Shotcrete de Hormigón reforzado con bajas cuantías de fibras y compararlo con dosis intermedias, de esta manera con datos tangibles lograr abaratar los costos en la elaboración de construcciones que involucren hormigones de estas características.

El objetivo específico de esta Memoria es "Caracterizar las propiedades de hormigones con bajas cuantías de fibras sintéticas". Para cumplir este objetivo se moldearán probetas para determinar la Tenacidad y Resistencias Residuales según los procedimientos expuestos en las normas EN 14651, ASTM C 1609. Esta investigación se enmarca en el desarrollo del Proyecto Fondecyt N°1150881.

En el Primer Capítulo abarca el marco teórico, lo cual abarca desde los tipos de fibras, sus usos y las características principales de estas. Además se presentara recomendaciones para el uso in situ de hormigones reforzados con fibras. Finalmente se terminara este primer apartado con las normativas ASTM C-1609 y EN 14651.

En el Segundo Capítulo se presenta el estudio empírico realizado en las dependencias del laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, en el cual se exponen los procesos realizados para el desarrollo esta memoria.

El Tercer Capítulo está dedicado a los Resultados y el análisis bajo las normativas ya mencionas, las cuales darán las características del hormigón.

Finalmente expondremos las Conclusiones de esta investigación.

A continuación se presenta el Primer Capítulo que está dedicado al Marco Teórico que sustenta esta Memoria:

Capítulo 1. MARCO TEÓRICO

En este Primer Capítulo se realizará una descripción respecto al Hormigón Reforzado con fibras. Comenzando por su definición y, en el Segundo Apartado, abordaremos los diferentes tipos de fibras para hormigones (Acero, Vidrio, Naturales y Polipropileno).

En el Tercer Apartado se mostrará la Influencia de la orientación y la concentración de la fibra ya que ésta no trabaja en todos los sentidos de la misma manera. Es por esto que se emplea de forma longitudinal de la probeta, tiene que tener el mismo sentido longitudinal de la fibra ya que en el otro sentido, no trabajan, y por tanto, no reciben esfuerzo. En tanto que las fibras que están en el mismo sentido de la vigueta sí trabajan, es por esto que se abordará este tema.

Posteriormente hablará de las Aplicaciones según el tipo de fibra y expondremos las Recomendaciones para la incorporación de hormigones elaborados in situ, así como las Recomendaciones para la incorporación de fibras en hormigones proyectados.

Finalmente, en el Apartado Seis se expondrá del Comportamiento mecánico en los hormigones fibroreforzados en estado endurecido y, en último Apartado, lo referido a las Normas.

I. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)

Se entiende básicamente como aquellos hormigones que en su composición incluyen fibras cortas distribuidas aleatoriamente en el volumen de éste. Dichas fibras no alteran la naturaleza del elemento.

La idea de los HRF es imitar el comportamiento del Hormigón Armado Tradicional, con la diferencia de que en vez de tener un refuerzo compuesto de barras acero con una orientación determinada, la matriz está constituida por una gran cantidad de fibras de pequeño diámetro aleatoriamente distribuidas.

Las fibras actúan sobre los esfuerzos de tracción a los cuales está sometido el hormigón, la función que cumple la fibra es controlar y reducir la intensidad de las fisuras producidas por estos esfuerzos al otorgar al hormigón un comportamiento dúctil luego de la fisuracion inicial, mejorando la tenacidad de este.

La tenacidad se entiende como el área bajo la curva de la gráfica ESFUERZO-DEFORMACIÓN, en la *Figura 01* se puede apreciar que al incorporar fibras al hormigón, se ve incrementada de manera considerable.

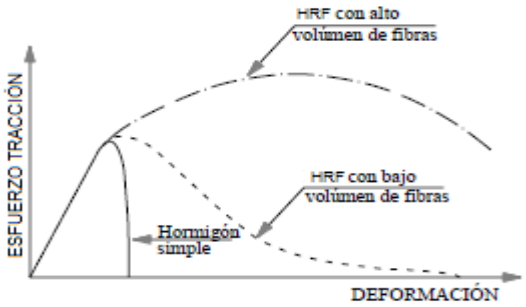


Figura 01 *Curvas típicas de Esfuerzo – Deformación para hormigón reforzado con fibras.*

La efectividad de las fibras se relaciona con la cantidad, dispersión y finuras de estas. Es evidente que en relación a la cantidad de fibras empleadas, el hormigón puede presentar diversos comportamientos, de esta manera dando diversos usos, tanto para elementos estructurales como no estructurales.

Las naturaleza de las fibras determinan la efectividad en la trasmisión de los esfuerzos, en la tabla 01 se muestra algunos de los materiales que se utilizan con frecuencia en la fabricación de fibras, indicando sus principales características.

Tipo de Fibra	Diametro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m2)	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo de Young (Gpa)	Alargamiento de Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1.0-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3.0-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11.0-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5.0-25
Polivinil	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7.0-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10.0-25
Basalto	0.0106	1593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11.0-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4.0-10

Tabla 01. *Tipos de fibras más comunes y sus propiedades (ACI 544.5R-10, 2010).*

II. TIPOS DE FIBRAS PARA HORMIGONES

Las fibras que se utilizan en la mezcla de hormigón son un refuerzo discontinuo, las cuales pueden ser rígidas o flexibles, estas se distribuyen de manera uniforme dentro del material. La efectividad que produzcan las fibras va a depender de una serie de factores pero, especialmente, de sus propiedades características (geométricas, físico-químicas y mecánicas.) naturaleza y tipo de fibra.

Para dar un adecuado uso a las fibras en el hormigón endurecido se deben contemplar las siguientes características:

- La cantidad volumétrica de fibras debe ser la adecuada.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Debe existir una buena adherencia entre la fibra y la mezcla de hormigón.
- Las fibras deben ser más rígidas que la mezcla, es decir, deben tener un módulo elástico mayor.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas en relación a su diámetro.

II.1. Fibras de Acero

La fibra de acero utilizada con frecuencia, es fabricada en base al estiramiento y corte de alambre de acero de diámetros que oscilan entre 0.25 a 0.76 mm, a su vez existe la fibra de acero plana, la cual es producida por un proceso de laminado de alambres de acero, las cuales presentan una sección 0.15 a 0.41 mm de espesor y de 0.25 a 0.90 mm de ancho. Por otro lado una fibra más eficiente es la de extremos ensanchados, debido a que proporcionan una mayor adherencia, homogeneidad y trabajabilidad de la mezcla.

Observemos la *Tabla 02* que resume las características generales de las fibras de acero:

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad promedio	7,8	g/cm3
Resistencia última a la tracción	2,8x10^3-4,2x10^3	Kg/cm3
Alargamiento a la rotura	0,5-3,5	%
Módulo de elasticidad	2,04x10^6	Kg/cm2

Tabla 02 *Propiedades técnicas de las fibras de acero*

Fuente: *http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx.*

La gran desventaja que presenta esta fibra es en la inclusión en el hormigón proyectado (shotcrete),ya que puede generar un fuerte desgaste en partes de los equipos utilizados para este tipo de hormigón, generando en ocasiones un bloqueo que suele ser bastante difícil de eliminar para la correcta aplicación del shotcrete.

II.2. Fibras de Vidrio

Son un elemento de origen mineral, se elaboran a partir de arena de sílice, a la cual se le añaden otros componentes, tales como cal, alúmina y magnesio, así como también óxidos en pequeñas cantidades, con el fin de obtener una fibra que pueda lograr un determinado requerimiento.

En la *Tabla 03* podemos ver algunas de las propiedades mecánicas que presenta este tipo de fibra:

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad promedio	2,7	g/cm3
Resistencia última a la tracción	3,3x10^4	Kg/cm3
Alargamiento a la rotura	4,4	%
Módulo de elasticidad	7,56x10^5	Kg/cm2

Tabla 03. *Propiedades técnicas de las fibras de vidrio*

Fuente: *http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx.*

Las aplicaciones en las que se puede emplear este material deben ser debidamente estudiadas, en las cuales se debe considerar los costos versus a los beneficios que esta presenta, ya que en bajas cantidades al incorporarse al hormigón incrementan considerablemente la resistencia a la flexión, tensión e impacto, dando como resultado un producto ligero y adecuadamente resistente.

II.3. Fibras Naturales

Estas fibras se pueden clasificar en dos grandes grupos, las de tipo orgánico y las de origen mineral. Dentro de las de origen orgánico, las más utilizadas son las de origen vegetal, las cuales se clasifican según su estructura como disposición, de esta manera encontramos:

a) Fibras cortas o unicelulares, generalmente suaves y lanosas como el algodón.

b) Fibras de células largas o múltiples, estas pueden ser duras (pita, yuca, etc.) y suaves (lino, cáñamo, etc.).

c) Órganos fibrosos completos, estas se forman por medio de fibras duras asociadas, encontramos las foliares (pajilla, cola de zorro, etc.), radiculares (raíces de algunas especies) y caulinares (mimbre, lianas en general, etc.).

Dentro de las fibras de origen mineral encontramos con frecuencia las de carbón, asbesto, entre otras.

La fibra de carbón se caracteriza por ser un filamento largo y delgado, el cual tienen entrelazados átomos de carbón paralelamente al eje central de la fibra, lo cual provoca una fibra compuesta por cristales increíblemente fuerte para su tamaño, es decir, forman un material ligero y de alta resistencia.

Algunas de las características técnicas de las fibras de carbón se presentan en la *Tabla 04.*

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad promedio	1,78	g/cm3
Resistencia última a la tracción	4,91x10^4	Kg/cm3
Alargamiento a la rotura	1,9	%
Módulo de elasticidad	2,59x10^6	Kg/cm2

Tabla 04 *Propiedades técnicas de las fibras de carbón*
Fuente: *http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx.*

La gran desventaja que presenta este tipo de fibra es su alto valor en el comercio, ya que supera por un amplio margen a los otros tipos de fibra.

II.4. Fibras de Polipropileno

Este tipo de fibra se caracteriza de ser muy estables ya que no reaccionan químicamente con el hormigón, son impermeables por lo que no disminuye la cantidad de agua de la mezcla, son livianas y tenaces, además de tener buenos resultados frente a las tenciones que sufra el hormigón.

Al no poder mezclarse con el agua tienen una baja adherencia con la pasta cementicia, además de tener un bajo punto de fusión, un módulo de elasticidad medianamente bajo y es de alta combustibilidad, siendo estas su mayores desventajas con el resto de las fibras.

En la *Tabla 05* podemos ver las propiedades técnicas de las fibras de polipropileno:

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad promedio	0,93	g/cm3
Resistencia última a la tracción	3,1x10^2	Kg/cm3
Alargamiento a la rotura	20	%
Módulo de elasticidad	9,97x10^3	Kg/cm2

Tabla 05 *Propiedades técnicas de las fibras de polipropileno*
Fuente: *http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx*

III. INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN Y LA CONCENTRACIÓN DE LA FIBRA

La orientación o disposición de las fibras, distribución y concentración influyen de gran manera en la resistencia y por tanto en el comportamiento del elemento reforzado. Se debe tener presente que existen diversas situaciones en las que pueden estar orientadas las fibras, dos situaciones extremas son que las fibras estén alineadas paralelamente al eje, mientras que su contraparte es que presenten una alineación determinada, sino más bien un orden al azar.

Diversos estudios avalan la teoría de que se produce una alineación preferencial en el sentidos de quedar paralelas a la dirección de flujo de las capas exteriores de las mezcla y una distribución aleatoria en el núcleo dela mezcla.

Básicamente la orientación va a depender de:

- Las Dimensiones y la forma del molde.
- La Temperatura del molde.
- La Temperatura del material.
- La Dimensión de la fibra.
- La Presión generada al verter el hormigón en el molde.

***Imagen 01**: Distribución de la fibra en la mezcla.*

IV. APLICACIONES SEGÚN EL TIPO DE FIBRA

Los hormigones reforzados con fibras de acero se emplean principalmente en la construcción de: túneles, estabilización de taludes, tableros de puentes, bases para equipos pesados (turbinas generadores de energía), losas apoyadas (pavimentos aeropuertos, carreteras, pisos industriales y militares), construcción y reparación de estructuras hidráulicas y marinas. Además de ser utilizadas para recubrimientos en general. También son empleadas en la construcción de elementos prefabricados como: las dovelas para túneles, bóvedas de seguridad, rompe olas, muros prefabricados para vivienda y, en general, para elementos que están expuestos a tensiones que puedan generar fisuración. De esta forma se reduce el refuerzo tradicional al necesitar una menor cuantía en los refuerzos acero, es por esto que se optimiza el proceso de fabricación de los elementos.

Hormigones reforzados con fibra de Vidrio se utilizan frecuentemente en tuberías, depósitos para líquidos, paneles de fachadas para edificaciones, tejas, mobiliario urbano, elementos

resistentes al fuego, encofrados, pavimentos, reparaciones arquitectónicas y generalmente en elementos prefabricados.

Los hormigones reforzados con fibras naturales se utilizan para la construcción de tejas, paneles, tuberías, estanques, viviendas sociales y en aislantes de ruidos y temperatura.

Los hormigones reforzados con fibras sintéticas, se utilizan en pavimentos, recubrimientos para túneles, soleras, bóvedas, paneles de fachada, piscina, hormigones proyectados, entre otros.

Al momento de seleccionar la fibra va estar condicionada principalmente en el uso a que está destinada, no obstante se debe considerar otros factores que influyen, como son los factores económicos, disponibilidad de materiales y la durabilidad de estos.

V. RECOMENDACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS IN SITU

Los hormigones fibroreforzados utilizan el mismo conglomerado que los hormigones convencionales pero con adición de las fibras, las cuales se consideran a nivel de producción y elaboración de la mezcla como un árido más, por lo que no existe la necesidad de realizar modificaciones en las cantidades de los componentes al incluirlas en el diseño de la mezcla.

Existen sugerencias fundamentales que se deben considerar al momento de incorporar fibras dentro del diseño, que implican una selección adecuada del elemento, de esta forma evitar problemas de segregación, exudación, aglomeramiento y garantizar una distribución uniforme. Dentro de las reglas podemos mencionar:

- La longitud de la fibra escogida debe ser mayor o igual al doble del diámetro del tamaño máximo del árido presente en la mezcla, permitiendo variaciones que no superen al 20% de la longitud.

- Para los hormigones fabricados in situ se debe tener presente la trabajabilidad del hormigón, para esto se debe considerar el grado de dificultad que implica la colocación de este material, lo que se sugiere es considerar un asentamiento adicional de una pulgada en el diseño de la mezcla, de esta forma se compensa la perdida de trabajabilidad que puede surgir por las fibras, esto se realiza para evitar posibles problemas en la mezcla de exudación, segregación y aglomeramiento.

- El asentamiento debe ser ajustado previamente y teniendo presente lo ya expuesto al considerar el aumento del asentamiento en una pulgada, la durabilidad y trabajabilidad de la mezcla debe ser contralada básicamente con la incorporación de aditivos fluidificantes, siempre cuando no exista una contraindicación en la aplicación de estos.

- la incorporación de fibras se debe realizar mediante una de las siguientes opciones:
  a) *Incorporación en la mezcla elaborada:* en este método las fibras son añadidas directamente al mixer una vez que la mezcla está elaborada. Para esta situación se sugiera el asentamiento antes de la incorporación mediante el ensayo de cono de

Abrams, de esta manera comprobar el asentamiento solicitado a la planta, respetando las consideraciones previamente mencionadas no debería presentarse ningún problemas con la trabajabilidad al incorporar las fibras.

b) *Incorporación a los áridos:* es cuando las fibras son incorporada en conjunto con los áridos en la mezcladora. En este caso se debe estudiar previamente la relación agua/cemento de la matriz, para lograr la trabajabilidad, la cual puede ser afectada pero no superando a una pulgada de lo previsto.

La utilización de estos hormigones fibroreforzados elaborados in situ no presenta ninguna consideración mecánica adicional que las de los hormigones comúnmente utilizados, por lo que el uso equipos como bombas y vibradores no presenta ninguna contraindicación, a su vez son totalmente validas, la única precaución que se debe tomar al momento de utilizar hormigones bombeados es respecto al diámetro de la manguera a utilizar, puesto que esta no debe superar el 70% del diámetro de la boquilla de salida del equipo de bombeo.

VI. RECOMENDACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE FIBRAS EN LOS HORMIGONES PROYECTADOS

Existen dos maneras de aplicar el hormigón proyectado o shotcrete, el primer método es por vía seca, en el cual se mezclan la arena, grava y cemento previamente y son transportados por mangueras mediante presión de aire, mientras que por otro lado, se expulsa agua por otra manguera, la cual finaliza en la boquilla que transporta el material inerte, así mezclándose al momento de salir de la manguera.

Otro método es por vía húmeda, que es esencialmente es preparar la mezcla del hormigón incluyendo el agua necesaria del conglomerado, y al igual que en el método anterior, la mezcla terminada es transportada por una manguera que expulsa el material por medio de presión de aire.

El hormigón proyectado se usa frecuentemente en obras de:

- Construcción de Túneles.
- Revestimientos de Taludes.
- Industria Minera.
- Trabajos de Saneamiento.
- Estabilización de excavaciones para fundaciones.

Algunas recomendaciones para la utilización de hormigones in situ:

- El tamaño máximo de los agregados no puede ser mayor a los 16 mm, además, es recomendable que las partículas que superen los 8 mm sean a lo más un 10% del total, en caso de no respetarse esto último, se producirá un rebote excesivo al entrar la mezcla en contacto con la superficie.

- Con respecto al agregado fino, este debe ser mayor a un 4% y menor al 9 %. En el caso de haber escases de material fino hará que la mezcla pierda cohesión, de esta forma afectando

la resistencia última del hormigón, por otro lado el exceso provoca segregaciones, las cuales tapan la boquilla de la manguera.

- Los aditivos que se empelan, tienen como objetivo mejorar las condiciones del material, en las que se destaca:
    - Aumentar la velocidad de fraguado.
    - Disminuir el rebote.
    - Dar una mejor distribución a los agregados.
    - Aumentar la trabajabilidad del hormigón.

- Si se utiliza el método por vía seca, no se recomienda el uso de fibras, ya que se produce una gran cantidad de rebote superando incluso el 50%.

VII. COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN LOS HORMIGONES FIBROREFORZADOS EN ESTADO ENDURECIDO

Dentro del comportamiento mecánico se distinguen tres tipos, los cuales son:

VII.1. El Comportamiento a la Compresión

La adición de fibras no modifica sustancialmente el comportamiento del hormigón a la compresión.

Se puede observar un ligero incremento en la resistencia del hormigón cuando las fibras superan el 1,5% en volumen de la mezcla.

Tanto el modulo elástico y el de Poisson no sufren alteraciones cuando las fibras no superan el 2% del volumen de la mezcla.

VII.2. El Comportamiento al Corte y la Torsión.

En general, las fibras incrementa la resistencia al corte y a su vez a la torsión del hormigón.

Para ensayos sobre vigas en donde sean utilizadas fibras para el corte y armadura longitudinal para flexión, se afirma que las fibras pueden substituir parcialmente o totalmente los refuerzos de estribos para esfuerzos tangenciales, de esta forma, modificando el mecanismo de ruptura por corte en ruptura por flexión, con contenido y tipo de fibra adecuados.

VII.3. El Comportamiento a la Flexotracción.

Para observar la incidencia de la fibra en hormigones fibroreforzados es necesario observar el punto de la primera fisuracion, ya que a partir de este punto las fibras realizan aportes importantes.

El mayor aporte que realizan estas fibras es que disipan la energía en el proceso de fractura, ya que convencionalmente el hormigón ante esfuerzos de flexión por tracción, sufre una fisuracion brusca y de golpe, las fibras permiten que este proceso sea más paulatino, de esta forma disminuye la intensidad de fisuracion, otorgando al hormigón un comportamiento más dúctil.

VIII. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO NORMADO

En este último apartado del Marco Teórico muestra un extracto de las Normas correspondientes a los ensayos de Flexotracción realizados en los tercios y en el centro de la viga, que son:

VIII.1. ENSAYO NORMA ASTM C 1609

La norma establece un método de ensayo el cual tiene como objetivo obtener la resistencia a la Flexotracción de elementos fibroreforzados por medio de la obtención de parámetros a través de la curva carga vs deflexión.

En las figuras 02 se aprecia el equipo empleado para realizar este ensayo:

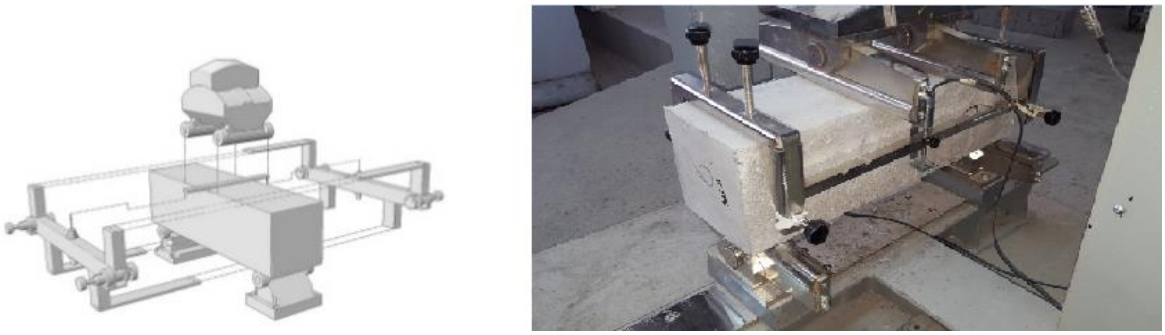


Figura 02. Situacion tipica astm

El ensayo se realiza con frecuencia con vigas con dimensiones de 150x150x530 [mm]. La norma analiza el comportamiento a flexion que es sometida la vigueta de hormigon usando parámetros que se derivan de la curva carga-flecha obtenida para carga a los tercios utilizan un equipo servohidraulico de lazo cerrado. Mediante esta prueba se determina la resistencia maxima en el primer peak de la curva y las respectivas resistencias residuales y tenacidades en las flechas que especifaca la norma.

Para la realización de este ensayo con carga en los tercios se utilizan 2 rodillos de apoyo simple a la vigueta y 2 rodillos de carga capaces de rotar en su propio eje. *Ver figura 03,* La carga y deflexión se controlan y se guardan hasta una deflexión final de L/150.

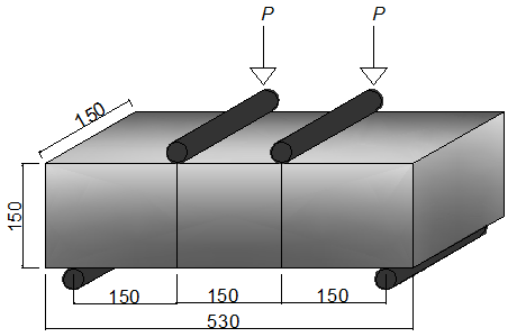


Figura 03, muestra la situacion tipica delensayo del dispositivo de carga ASTM

Las viguetas elaborados y ensayadas bajo esta normativa tienen una longitud total de 530 [mm], con un alto de 150 [mm] y un ancho igual a 150 [mm], la luz entre apoyos es de 450 [mm]. Para el caso de las probetas de Hormigón Reforzado con Fibras se cargarán por la misma cara en que se vertió el hormigón.

Si el contacto superficial entre los rodillos y la probeta no es continuo, es necesario mejorar la superficie de apoyo, para esto se raspa la zona con problemas de la muestra hasta conseguir el contacto adecuado entre las superficies de los rodillos y la vigueta.

Para seleccionar los parámetros del ensayo se debe considerar la aplicación final que se le quiera dar al hormigón estudiado, para esto se debe definir 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 fisuracion.

La maquinaria a utilizar para este ensayo debe tener la cualidad 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.

Por medio de este ensayo se puede determinar la capacidad de deformación que la fibra aporta al incorporarse en la muestra después de alcanzar la resistencia máxima a flexión.

Además del esquema, se presenta la siguiente expresión. La cual es utilizada para determinar la resistencia máxima *fct* 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.

$$f_{ct} = \frac{Pl}{bd^2}$$

.

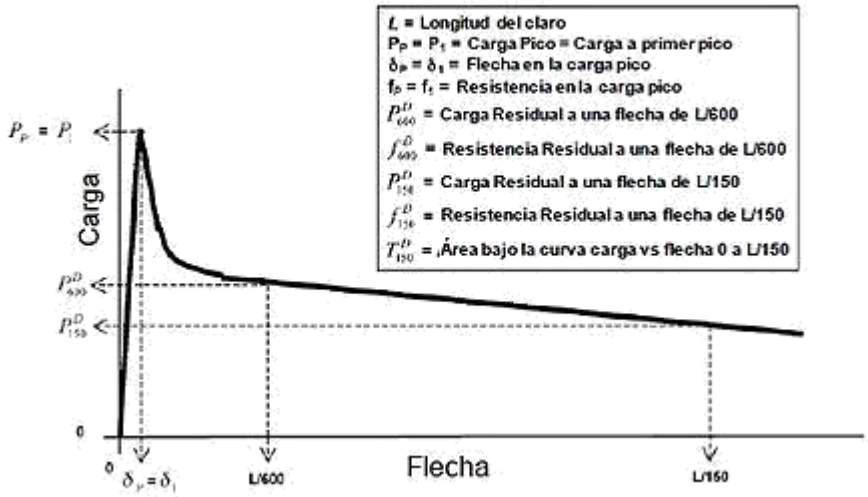


Figura 04, curva carga vs flecha para determinar los parámetros de carga residual

En la *Figura 04* 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 ultima 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 (lc). 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 fD 600 y Fd 150 para flechas iguales a L/600 y L/150, en donde L en este caso es 450 [mm]

**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).*

Expresión de los Resultados

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

Para esto es necesario 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 determinar la deflexion en el primer pico se utiliza la siguiente expresion:

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

En donde:

δ_1 = La primera deflexión máxima [mm]. 0
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.

Posteriormente se calcula el valor de Resistencia Residual, para el cual se utiliza la siguiente formula:

$$\boldsymbol{f = \frac{PL}{bd^2}}$$

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] más cercano.

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 determinar la resistencia residual a la flexión equivalente RDT mediante la siguiente expresion:

$$\boldsymbol{R^D_{T\,150} = \frac{150 * T^D_{150}}{f_1 * b * d^2} * 100\%}$$

En donde:

$R^D_{T\,150}$ = Resistencia residual a la flexión equivalente.
F1 = fuerza del primer peak MPa.
T^D_{150} = Tenacidad en L/150. Joule.
b = la anchura media de la muestra a la fractura [mm].
d = la profundidad media de la muestra [mm].

Una vez expuesta la Primera Norma veremos a continuación los procedimientos correspondientes al Ensayo a la flexotracción según la Norma EN-14651:

VIII.2. 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 fibras de polipropileno considerando que en general sus características y propiedades son similares a las fibras metálicas.

Esta norma da aconocer un método de ensayo el cual tiene como objetivo determinar la resistencia a la flexotraccion 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 se debe tener especial cuidado al uso de las entallas, por las concentraciones de tensiones que se presentan al momento de realizarla.

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 05

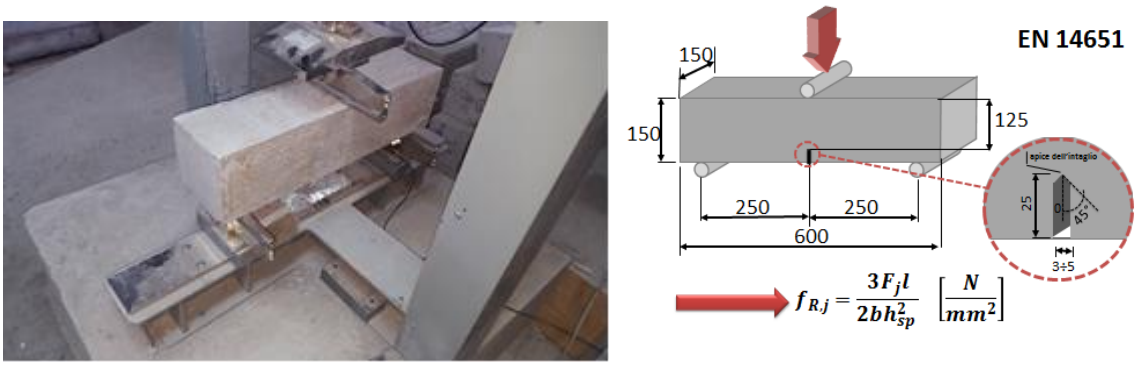


Figura 05, situacion tipica EN-14651

Las dimensiones que deben cumplir las viguetas confeccionadas y ensayadas bajo esta normativa son: largo de 600 [mm], siendo su alto y ancho de 150 [mm] respectivamente, además presentan un entalle central (ver figura 05.) de profundidad de 25 [mm] y un espesor de 3 [mm].

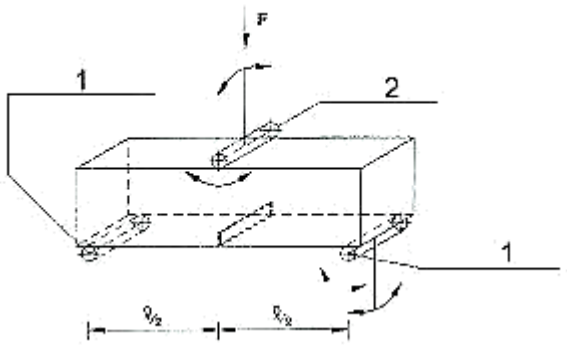


Figura 06, Configuración del entalle y carga sobre la probeta (Norma EN-14651).

En la zona de la entalla se coloca un transductor para la medición de desplazamiento de la fisura, 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 permite realizar 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 es poder medir el CMOD (crack mouth opening displacement), este mide las cargas aplicadas en el ensayo a la vigueta a medida que se va agrietando hasta llegar a un máximo de 4 [mm]. El transductor está conectado al equipo de ensayo, a su vez envía todos los datos para ser registrados hacia el ordernador, el cual mediante la plataforma "MCC8 Multitest" registra todos los datos del esayo. Ademas, el software permite controlar todos los parámetros necesarios para realizar las mediciones de la mejor forma posible.

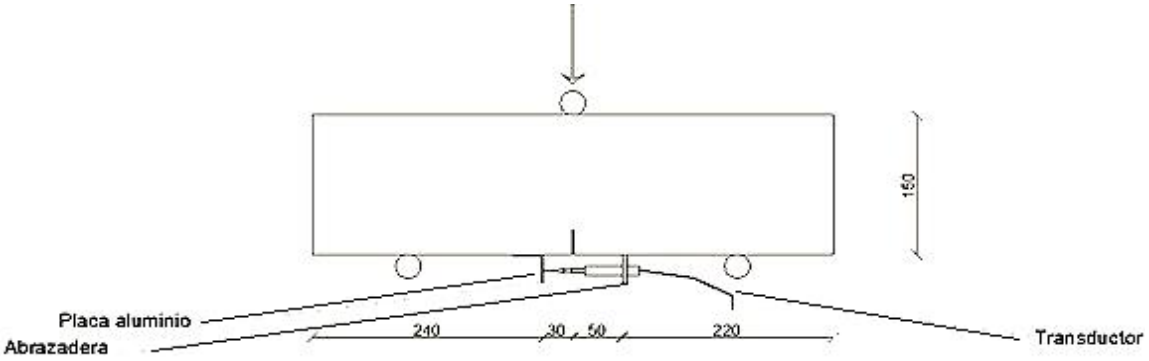


Figura 07.: Detalle de Instalación de transductor, placa de aluminio y bastidor (Norma EN-14651)

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:

$$CMOD = CMOD_Y * \frac{h}{h + y}$$

En donde:

CMOD: Desplazamiento al borde de la fisura.

CMODy: 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 (F1 y F3 respectivamente), se obtiene el valor de resistencia a flexo tracción y los valores de resistencia residual a flexo tracción correspondientes FR1 y FR3.

El límite de proporcionalidad se determina con la siguiente expresión:

$$f_{ctL}^{f} = \frac{3 * F_L * L}{2 * b * h_{sp}^2}$$

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 08.

El valor de la carga FL se debe determinar trazando una línea paralela al eje de la carga del diagrama carga-CMOD a una distancia de 0,05 mm, y considerando FL como el mayor valor de la carga en el intervalo de 0,05 mm. Tal como se muestra en la Figura 07 (Norma EN-14651)

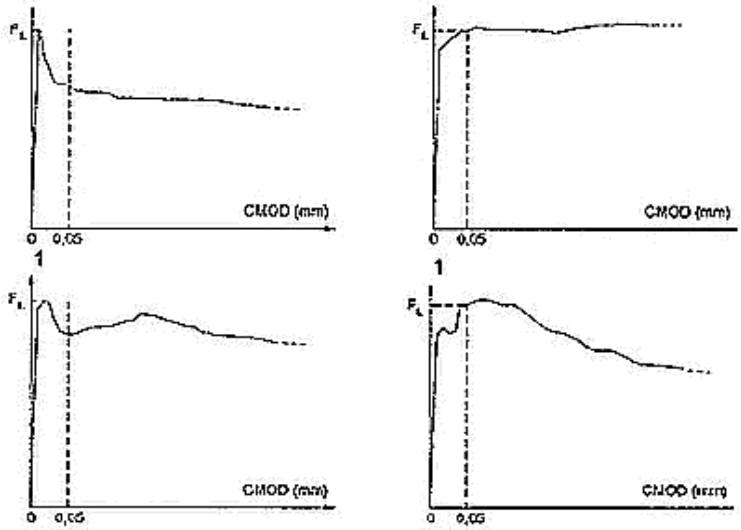


Figura 08. Diagramas de carga-CMOD y Fl (EN_14651).

Para determinar los esfuerzos residuales a la tracción por flexión (aportados por las fibras) se utiliza la siguiente expresión:

$$f_{R,j}=\frac{3*Fj*l}{2*b*h_{sp}^2}$$

En donde:

$f_{R,j}$*: Resistencia residual a la tracción por flexión en MPa.*
Fj: Carga correspondiente a CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, con j (1,2,3,4) en Newtons.
L: Longitud del vano en milímetros.
b: Anchura de la probeta en milímetros.
h^2sp*: Distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en milímetros.*

La siguiente figura esquematiza los cuatro puntos a los cuales se le determina la resistencia residual.

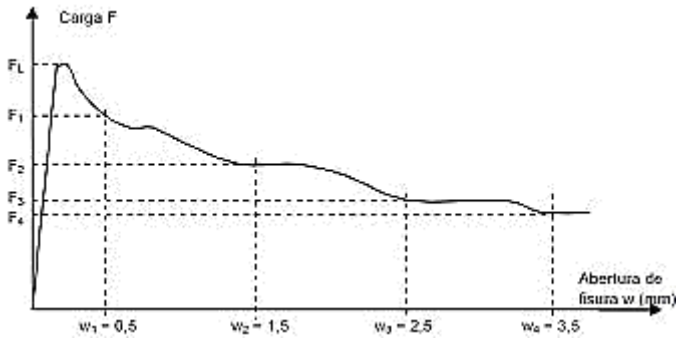


Figura 09: Curva carga v/s CMOD, indicando CMOD1, 2, 3, 4 (EN-14651).

En este punto se han mostrado dos Normas y, cabe destacar que, la gran diferencia en los ensayos es que la Norma europea tiene una entalla en el centro de la vigueta, por lo tanto, se guía la grieta gracias a esa entalla, conduciendo la carga hacia el eje central. Con lo cual es un Ensayo más rápido y más controlado.

Por el contrario, la Norma ASTM tiene carga en los dos tercios centrales, esto es: tiene carga en cada tercio de la vigueta. Ahora bien, al no ser guiada la grieta, no aparece dentro del parámetro del primer tercio.

Capítulo 2. EXPERIENCIA EN LABORATORIO

En este segundo capítulo se presentarán los procedimientos y materiales empleados para los Ensayos 1 y 2. Así como la preparación del Equipo de Ensayo, Procedimiento de Laboratorio la Ejecución del mismo y Selección de Materiales.

Para llevar a cabo esta experiencia se confeccionaron probetas de HRF, las cuales se utilizaran para determinar el comportamiento del hormigón bajo las normativas mencionadas en el capítulo anterior.

En una primera parte se analizaran probetas prismáticas con cargas a los tercios tal como se manifiesta en la norma ASTM C1609, por otro lado en una segunda parte se analizaran probetas bajo la norma EN-14651 con una entalla en el centro de la luz entre apoyos.

Para ambas normativas se utilizara una misma dosificación, la cual es dada por el proyecto Fondecyt N°1150881, la cual se muestra en la siguiente tabla:

ELEMENTO	DOSIFICACIÓN KG/M³
ARENA 0/5	1550
GRAVA 5/10	150
AGUA	210
CEMENTO (ALTA RESISTENCIA)	450
ADITIVO SUPER PLASTIFICANTE	4,5

Tabla 06 Dosificación Proyecto Fondecyt N°1150881

Además para todas las probetas se utilizara la misma dosificación de fibras de polipropileno de 4 kg/m^3, con el objetivo de obtener resultados tangibles para determinar si elementos con bajas cuantías de fibras se pueden considerar como elementos estructurales.

En una primera parte se analizaran probetas prismáticas bajo la normativa ASTM C1609, las cuales tienen una dimensión de 150x150x530mm. Para este ensayo la luz libre entre los apoyos (L) es de 450 mm. Este ensayo consiste en un método sobre vigas sometidas a flexión con carga a los tercios, el objetivo de este ensayo es medir la deflexión al centro de la viga, y se grafica la curva carga-desplazamiento. Se determinan las cargas de post-fisuracion para niveles de deflexiones prestablecidos, 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.

Imagen 02 Ensaye ACTM C1609

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 fisuracion”. 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.

Las dimensiones de las probetas confeccionadas en laboratorio son: 150 x 150 x 600 [mm.] con una entalla de una pulgada. Las ventajas de este método es que al tener la fisura una guía por medio de la entalla, se optimiza considerablemente el tiempo de ensaye, de esta manera el desplazamiento de apertura en los bordes de la fisura (CMOD) es estable. 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.

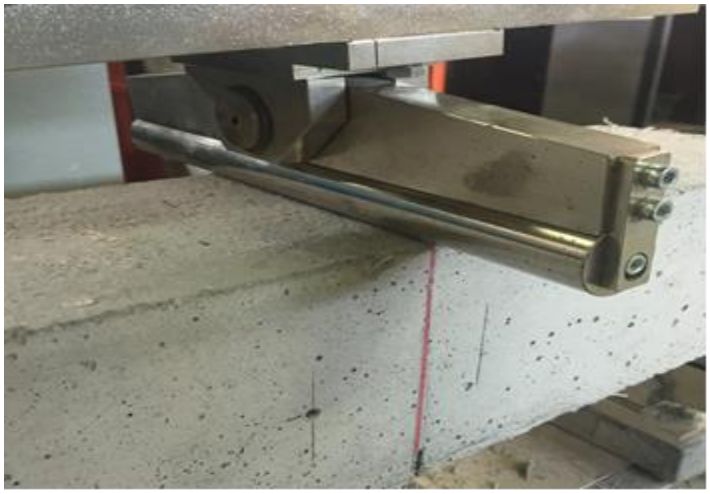


Imagen 03 Ensaye EN 14651

A. MATERIALES EMPLEADOS

A continuación se presentan los materiales utilizados durante los Ensayos 1 y 2. Que son:

A.1. Áridos

Con respecto a los áridos, estos deben cumplir con ciertos requisitos, los cuales se analizaron acorde a la NCH163, la cual indica de manera general que el conjunto de debe estar formado por partículas duras, con morfología y tamaños estables, limpios y libres de terrones, etc.

A continuación se presentan los requisitos y análisis que se le tuvo que hacer a los materiales:

Se comienza con los requisitos que debe cumplir la arena, esta debe ser negra, ya que en la zona los otros tipos de arenas, se encuentran compuestas por material orgánico además de contener esqueletos de fauna marina (ej.: conchitas de varias especies.), debe ser menor a 5mm, además tal como se especifica en la tabla n°1 de la NCH163 debe tener un contenido máximo de finos de un 5%.

Otro tema fue conseguir la arena que cumpla estos requisitos en la zona, por lo cual se contactó a Áridos Vázquez ubicados en placilla y se les solicito una muestra para corroborar que el material cumpla con los requisitos necesarios.

Lo primero que se realizó es secar el material en horno de un día para otro para realizar la granulometría del material, para lo cual se utilizó una muestra de 500 gramos y tras ser tamizada arrojó los siguientes resultados:

TAMIZ	% PASA
3/8"	98,2
N°4	87,2
N°8	58,4
N°16	41,6
N°30	30
N°50	12,4
N°100	4,2
< N°100	0

Tabla 07. Resultados tamizado de la muestra.

Debido a que en el tamiz de 3/8” retiene un 1.8%, se considera como sobre tamaño y se excluye de los resultados, entregando los siguientes datos.

TAMIZ	% PASA
3/8"	100,00
N°4	88,80
N°8	59,47
N°16	42,36
N°30	30,55
N°50	12,63
N°100	4,28
< N°100	0,00

Tabla 08. Resultados tamizado de la muestra excluyendo el sobre tamaño.

Con los datos obtenidos se puede inferir que el material es de tipo compuesto y que contiene grava, la cual es aproximadamente un 10 % del total de la arena, esta grava es de tamaño inferior a los 10 mm y superior a los 5 mm, por lo cual cumple con la especificación de la grava, además en la proporción que se encuentra, se asemeja mucho a la dosificación entregada por el proyecto, por lo cual si se obtiene un bajo porcentaje de material fino el material se acepta cumplimento tanto los requisitos de arena y grava.

Para determinar el porcentaje de material de fino utilizamos el procedimiento contenido en la NCH1223, el cual consiste en determinar una masa inicial de una muestra de ensayo, separar el material fino mediante lavado y tamizado, expresando la pérdida del material respecto a la masa inicial de la muestra.

Se utilizó una muestra la cual previamente se homogenizo cuidadosamente en estado húmedo y se metió a horno para poder ensayar, una vez sacada del horno se procedió a realizar el ensaye, el cual consiste en el lavado y tamizado del material, una vez que la muestra esté libre de finos se procede a meter al horno nuevamente para realizar la medición final.

Antes de realizar el lavado y tamizado de la muestra se pesó en una balanza electrónica arrojando el valor de 511 gramos y posterior al lavado esta entrego un valor de 479 gramos.

Para calcular el material fino inferior a 0.080 mm, se utiliza la siguiente expresión aproximando el resultado a 0,1%:

$$F = \frac{m_a - m_d}{m_a} x100$$

En donde:

F = Contenido de finos (%).
m_a = Masa árido seco antes de lavar (g)
m_d = Masa árido seco después de lavar (g).

$$F = \frac{511 - 479}{511} x100 = 6.3\%$$

Como se mencionó anteriormente el material debe contener un porcentaje de finos inferior a un 5%, pero la Nch163, en una de sus notas expresa que en el caso de los áridos tratados por trituración, el límite de fino asciende a un valor de un 7%, el material de la planta de placilla se obtuvo por este método quedando en evidencia por la morfología de los áridos, por lo cual el material se acepta, cumpliendo simultáneamente los requisitos tanto de la arena y de la grava.

A.2. Cemento

El cemento a utilizar según el proyecto Fondecyt N°1150881 es de alta resistencia, 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 tiene un riguroso proceso de autocontrol de producción, el cemento "Polpaico 400" es muestreado en la Planta Polpaico por IDIEM de la Universidad de Chile, las especificaciones del cemento se muestra a continuación en la siguiente tabla en conjunto de las especificaciones que debe cumplir según la norma NCH 148 OF.68

Características Químicas y Físicas	NCh 148. Of68	Cemento Polpaico P 400
Expansión en autoclave, %	1 máx	0,06
Pérdida de calcinación, %	5,0 máx	4
Residuo insoluble, %	50,0 máx	15,3
Contenido de SO3, %	4,0 máx	2,1
Peso específico, Kg/dm3	-	2,9
Tiempos de fraguado (Vicat)		
Inicial, minutos	35 min.	130
Final, minutos	600 máx	180
Finura (Blaine, cm2/g)	-	4700

Tabla 09.: Especificaciones cemento Polpaico P400 (polpaicoconexion).

Dentro de las aplicaciones que tiene el cemento Polpaico P 400 es que es uno 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 vanguardia.

Es importante destacar que este material debe mantenerse en un lugar seco y con bajo porcentaje de humedad, de esta manera se evitan aglomeraciones del material antes de ser usado.

A.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 e incorporadores de aire.

El HRF por contener diversas dosis de fibras agregadas a su composición, en este caso la dosis de fibra es de 4 kg/m^3, 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 relación agua cemento afectando directamente la resistencia y durabilidad esperada, para evitar esta problemática se recurre a los beneficios del aditivo Viscocrete 5100 CL.

El Sika Viscocrete 5100 CL es un aditivo de alta capacidad de reducción de agua basado esencialmente en polímeros sintéticos que permite máxima fluidez, alta cohesión y mantener la trabajabalididad 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.

Esta adición otorga al hormigón un aumento considerable de la docilidad, produciendo un hormigón con buena trabajabilidad, y a su vez mejorando las resistencias mecánicas iniciales y finales. Esto se obtiene producto 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%.

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.

A.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-fisuracion.

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.

Características	Propiedades del material
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/kg	33,000 - 59,500
Gravedad específica	0.90-0.92
Módulo de Young	7,1 Gpa - 10 Gpa
Punto de Fusión	150 °C - 170 °C
Punto de ignición	Superior a 450 °C

Tabla 10. Propiedades de la fibra sintética EPC (elastoplastic.com/index.php/products).

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. A continuación, en la *Tabla 11* se presentan las características del producto.

Características	Propiedades del material
Base Material	Olefina Modificada
Longitud	54 mm
Resistencia a la tracción	640 Mpa
Textura de superficie	Continuamente en Relieve
No. Fibras/kg	37000
Gravedad específica	0.90-0.92
Módulo de Young	10 Gpa
Punto de Fusión	159 °C - 179 °C
Punto de ignición	Superior a 450 °C

Tabla 11: Características de la fibra sintética Barchip 54(elastoplastic.com/index.php/products).

La tabla 10 muestra las caracteristicas generales de las fibras sienteticas de la empresa EPC, mientras que la tabla 11 muestra las propiedades específicas de la Fibra Barchip 54 de la marca EPC.

B. PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO

Para la realización de este Proyecto, se utilizaran las dependencias del *Laboratorio de ensayo de Materiales d*e la *Universidad Técnica Federico Santa María* (LEMCO), el cual cuenta con una serie de equipos a la vanguardia, permitiendo llevar a cabo este estudio.

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].

B.1. Preparación de materiales y herramientas

El primer paso pasa comenzar la fabricación de las probetas es la preparación de los moldajes, estos deben ser correctamente limpiados y se les debe colocar una película 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 12.*

Previo al hormigonado de una amasada se deben preparar los materiales a utilizar, para esto se utilizaran tinetas para la arena y el agua, para las fibras utilizaremos pailas y para el aditivo se utilizara probetas plásticas graduadas. Cabe destacar que todo el árido a utilizar fue secado en los hornos de las dependencias del laboratorio.

El procedimiento de hormigonado se realizó con la supervisión de Don Tomas Pacheco (encargado del laboratorio LEMCO), el orden de los materiales que se utilizo es el siguiente:

- 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.

La siguiente tabla muestra el número de vigas confeccionadas por norma y numero de amasadas.

TIPO	MOLDES PROGRAMADOS	
AMASADA 1		
(4 kg/m³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530)	2 VIGAS (150X150X600)
AMASADA 2		
(4 kg/m³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530)	2 VIGAS (150X150X600)
AMASADA 3		
(4 kg/m³ FIBRA)	4 VIGAS (150X150X530)	1 VIGA (150X150X600)
AMASADA 4		
(4 kg/m³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530	2 VIGAS (150X150X600)
AMASADA 5		
(4 kg/m³ FIBRA)	3 VIGAS (150X150X530	2 VIGAS (150X150X600)
AMASADA 6		
(4 kg/m³ FIBRA)	4 VIGAS (150X150X530)	1 VIGA (150X150X600)
AMASADA 7		
(4 kg/m³ FIBRA)	5 VIGAS (150X150X600)	

Tabla 12.: Distribución por cada amasada del HRF.

Imagen 04. Las siguientes imágenes muestran la betonera del laboratorio y los materiales preparados para realizar el hormigonado.

B.2. Hormigonado de las probetas

Una vez teniendo preparados los moldajes y teniéndolos posicionados para realizar el hormigonado, se nivelan las probetas, posteriormente se vierte el contenido de la betonera en 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.

El siguiente paso corresponde a la compactación del hormigón lo cual se realiza con un pisón, ya que el hormigón al ser fluido no puede realizarse con sonda de inmersión, ya que podría provocar problemas de segregación en la mezcla, su forma correcta de realizar es insertando la barrilla 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, finalmente con una plana se procede a dar la terminación de las probetas.

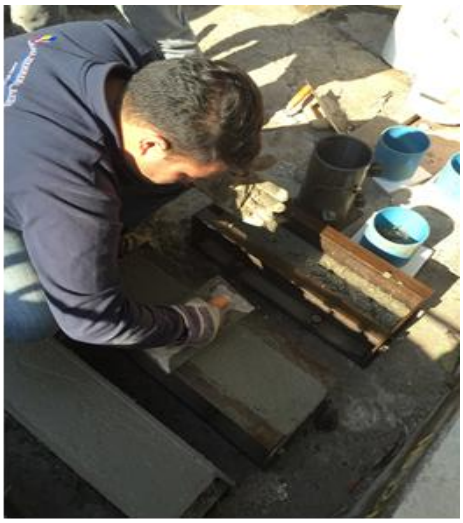


Imagen 05. Probetas de hormigón durante el proceso de terminación.

B.3. Curado de las probetas

Para que el hormigón no sufra agrietamientos por pérdidas de agua se debe curar las probetas adecuadamente, para eso se debe mantener el hormigón en 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 fisuracion. 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 membranas de curados 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 bajo condicionas optimas 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.

Imagen 06.: Probetas cubiertas con polietileno (LEMCO 2015).

Una vez expuestos los materiales empleados en las experiencias de laboratorio, expondremos cada uno de los Ensayos realizados:

PRIMER 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 una pulgada (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, de esta forma se deja compartido el error.

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. Además, se revisa la escuadría de las probetas, principalmente se revisan los puntos de apoyos que estén alineas y a plomo, de esta maneras se minimizan los errores por la geometría de la muestra.

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 que receben del ensayo al software de la computadora encargada de procesar y entregar los datos del ensayo, este transductor se instala en el eje longitudinal de la probeta. 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.

Imagen 07 probeta entallada con abrazadera que recibe al transductor y escuadra metálica (LEMCO 2015).

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] 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. 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 ± 2,0 [mm].

Imagen 08. Probeta instalada según esquema general EN-14651 (LEMCO 2015).

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.

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 ensaye, 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 [µm/s] a fin de estabilizar el sistema de ensayo. Una vez teniendo el ensayo completamente estabilizado se procede a aumentar la velocidad hasta 1 [µm/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”.

Imagen 09.: Aplicación del ensayo EN-14651 (LEMCO 2015)

SEGUNDO ENSAYO: BAJO LA NORMATIVA ASTM C-1609

1. Preparación del Equipo de 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.

Lo siguiente es verificar que no existan irregularidades en las caras que serán apoyadas en la prensa, en el caso que exista alguna de debe procederá a limar la irregularidad y eliminar las irregularidades.

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 se procede a la colocación en el equipo y comienzo del ensayo.

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 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.

Imagen 10.: Abrazaderas y estructura del transductor que mide la flecha. (LEMCO 2015).

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.

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 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 [µm/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.xlsx* con el que se puede obtener la gráfica "Carga v/s Flecha".

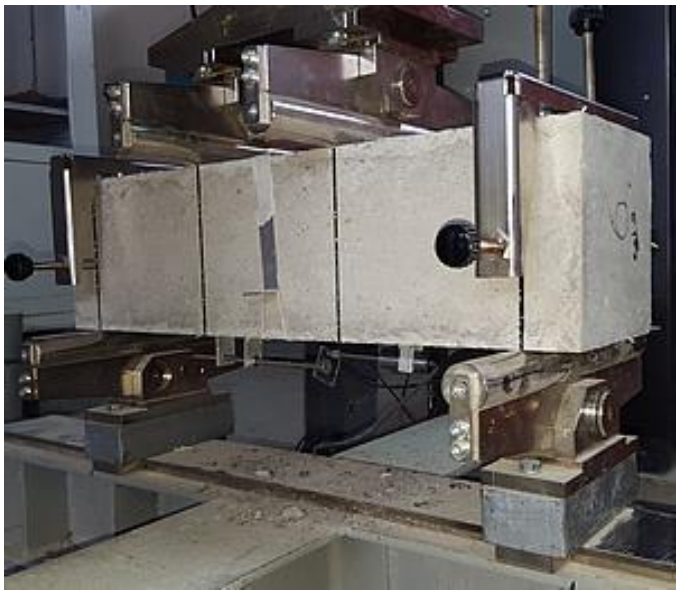


Imagen 11.: Aplicación del ensayo ASTM C-1609 (LEMCO 2015).

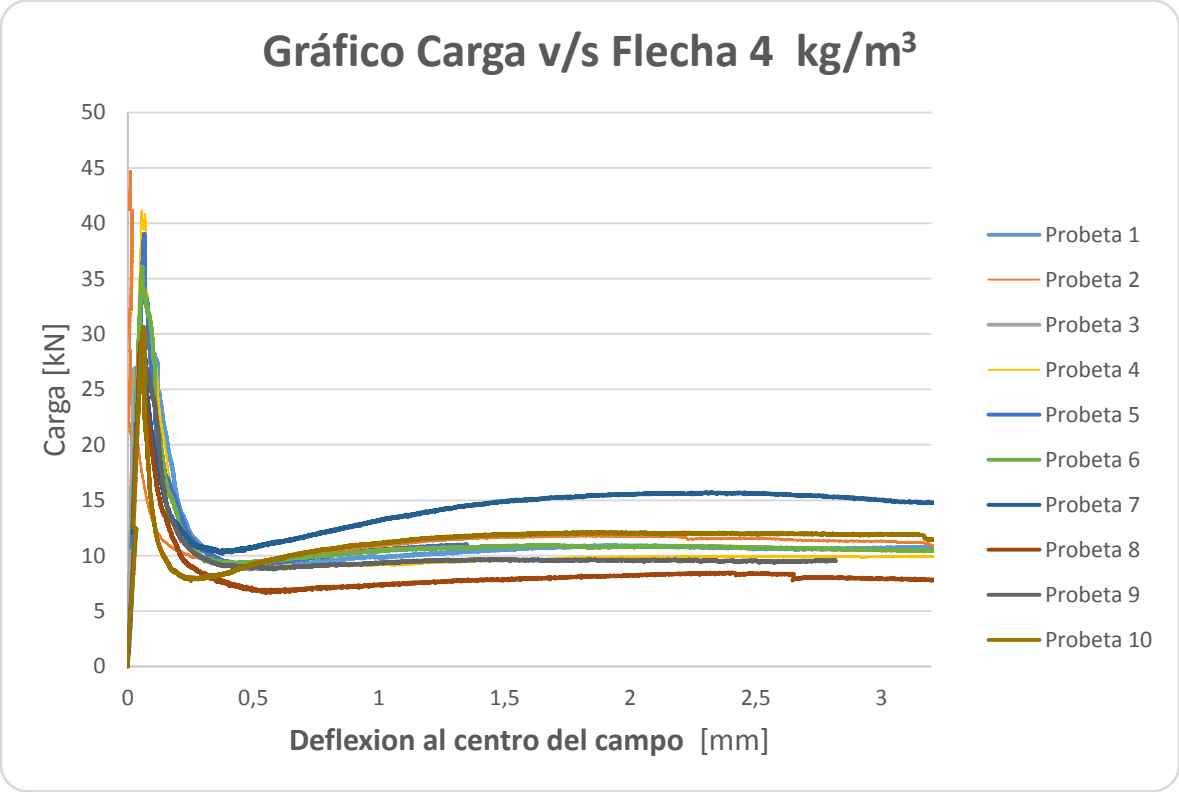
Capítulo 3. Resultados

A continuación se presentan se muestran los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión, bajo las normativas internacionales ASTM C-1609 (con carga en los tercios centrales) y Europea EN-14651 (con entalla y carga en el centro de la luz de las probetas).

Norma ASTM C-1609

Una vez realizado el ensayo con carga a los tercios sin entalle a diferentes muestras, se eligen 10 probetas al azar, a las cuales se le realiza el análisis descrito en la sección de normas de esta memoria.

A continuación se presenta la gráfica 01 la cual muestra los resultados obtenidos mediante este ensayo, es importante mencionar que estos resultados obtenidos se les debieron realizar ciertas correcciones, de esta forma se obtienen datos objetivos para realizar el análisis.

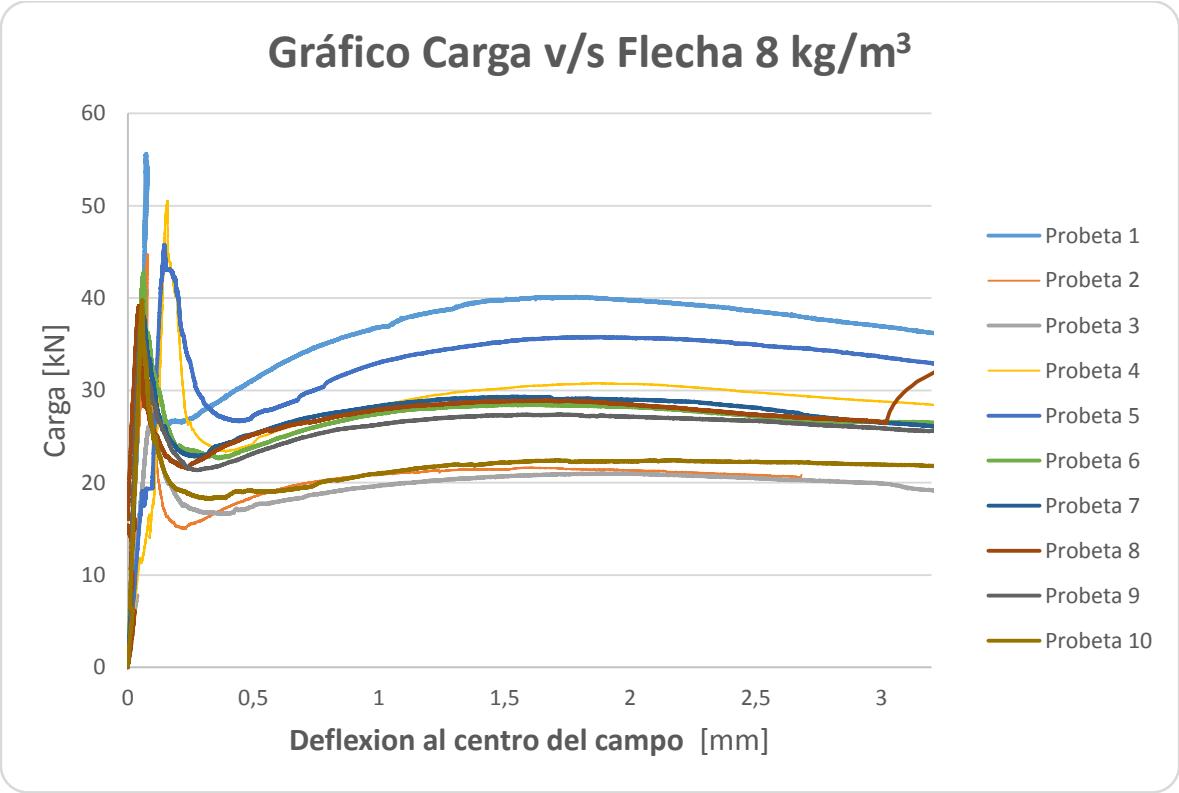


Grafica 01, resumen carga vs deflexión ensayo ASTM C-1609

Como se puede observar de la gráfica resumen se puede identificar claramente tres comportamientos en las viguetas. En un primer tramo se observa una pendiente pronunciada ascendente, la cual muestra el comportamiento a la flexión de estas, si bien existe una clara dispersión entre los resultados, todas las muestras presentan el mismo comportamiento hasta llegar a un peak, este peak es la resistencia máxima del hormigón hasta llegar al punto de agrietamiento.

El segundo tramo muestra una curva con una brusca pendiente negativa, la cual es producto de la fragilidad del hormigón. El tercer y último tramo muestra una pequeña recuperación, la cual es la resistencia aportada por las fibras.

Antes de pasar al análisis de esta norma se presenta la gráfica 02, la cual muestra los resultados de 10 probetas bajo las cuales se confeccionaron bajo los mismos parámetros y condiciones, la única diferencia es que estas presentan 8 kg/m^3 de la misma fibra sintética.



Grafica 02, resumen carga vs deflexión ensayo ASTM C-1609.

Como se observa, mantienen el mismo comportamiento que la dosificación con 4 kg/m^3, pero con una recuperación mucho más pronunciada.

Continuando con el análisis se determinan los valores de carga pertinentes a cada ensayo según flecha mencionados en la norma (L/600 y L/150).

CARGAS en [kN] según deflexión en L/600 y L/150		
PROBETA	0,75	3
Probeta 1	9,288	10,618
Probeta 2	10,213	11,314
Probeta 3	6,924	7,41
Probeta 4	9,067	9,899
Probeta 5	10,885	12,411
Probeta 6	9,865	10,62
Probeta 7	11,53	15,466
Probeta 8	6,884	8,361
Probeta 9	9,018	9,462
Probeta 10	9,818	11,914
PROMEDIO	**9,349**	**10,748**
Coeficiente de Variación	**±0,161**	**±0,210**

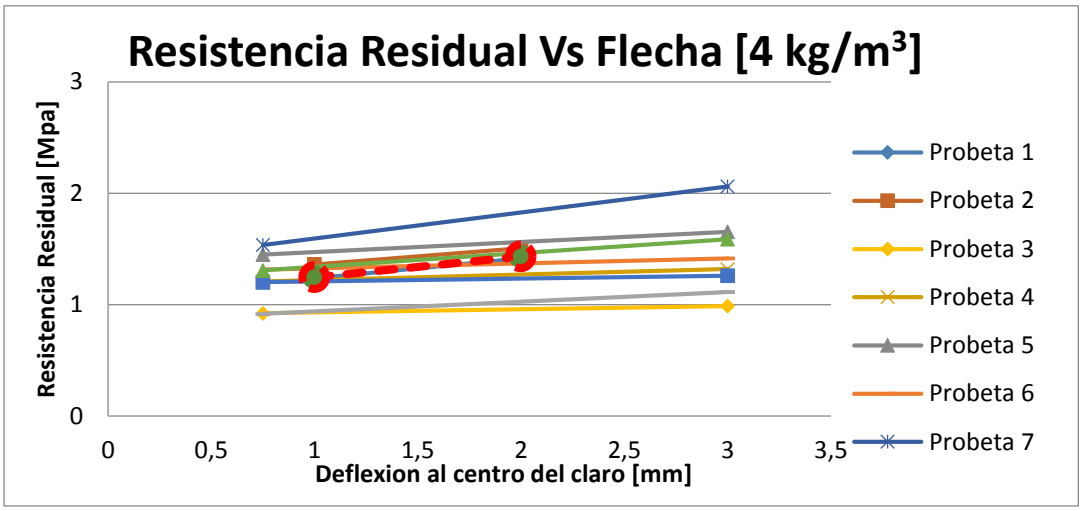
Tabla 13, valores de carga según flecha en L/600 y L/150.

Con los datos obtenidos de la tabla 13, se procede a utilizar la expresión expuesta en la sección de normas para determinar la resistencia residual, dando como resultado la tabla 14.

RESISTENCIAS RESIDUALES en [MPa] según deflexión en L/600 y L/150		
PROBETA	**0,75 [mm]**	**3 [mm]**
Probeta 1	1,238	1,416
Probeta 2	1,362	1,509
Probeta 3	0,923	0,988
Probeta 4	1,209	1,320
Probeta 5	1,451	1,655
Probeta 6	1,315	1,416
Probeta 7	1,537	2,062
Probeta 8	0,918	1,115
Probeta 9	1,202	1,262
Probeta 10	1,309	1,589
PROMEDIO	**1,247**	**1,433**
Coeficiente de Variación	**±0,161**	**±0,210**

Tabla 14, valores de resistencia residual según flecha en L/600 y L/150.

Para poder observar estos datos de manera más sencilla, se presenta la siguiente gráfica, la cual muestra las curvas de resistencia residuales y su promedio.



Grafica 03, Resistencia Residual vs Flecha fibra sintética 4 [kg/m3].

Como se observa en la gráfica, el comportamiento de la fibra en todo los caso es aumentar la resistencia residual a medida que aumentan las deflexiones de las muestras, si bien el aumento de la resistencia en ambos puntos no es inmenso, mantiene una tendencia al aumento, lo que es significativo ya que se ratifica el comportamiento esperado de la fibra, entregando resultados óptimos.

El máximo valor de resistencia residual alcanzado en todos los casos se encuentra en L/150 = 3 [mm]. Esto entrega un resultado positivo, ya que en todos los casos el trabajo de la fibra ante los esfuerzos fue en aumento, de esta manera se confirma la efectividad de la fibra.

Continuando con el análisis se debe determinar las resistencias equivalentes (RDT_{150}), para esto se debe determinar la tenacidad en L/150 como se especifica en la norma, la tabla 15 muestra estos valores.

TENACIDAD según deflexión en L/150	
PROBETA	**3 mm**
Probeta 1	31,529
Probeta 2	32,530
Probeta 3	22,111
Probeta 4	30,512
Probeta 5	34,453
Probeta 6	30,685
Probeta 7	38,577
Probeta 8	21,341
Probeta 9	27,249
Probeta 10	27,740
PROMEDIO	**29,673**
Coeficiente de Variación	**±0,178**

Tabla 15, valores Tenacidad en L/150.

Con estos valores se procede a determinar RDT_{150}, esto es sumamente importante, ya que la norma hace hincapié a que este valor es incluso más veraz que el obtenido, esto se debe a que la tenacidad representa el área bajo la curva Resistencia Residual v/s Flecha, curva compleja que posee una gran cantidad de resultados 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 T150 obtenido calculamos la resistencia equivalente a esta tenacidad, la cual es totalmente representativa de la muestra. La tabla 16 muestra los resultados de RDT_{150} de las viguetas.

PROBETA	RDT_{150}
Probeta 1	1,401
Probeta 2	1,446
Probeta 3	0,983
Probeta 4	1,356
Probeta 5	1,531
Probeta 6	1,364
Probeta 7	1,715
Probeta 8	0,948
Probeta 9	1,211
Probeta 10	1,233
PROMEDIO	**1,319**
Coeficiente de Variación	**±0,178**

Tabla 16, Resistencia Residual Equivalente para 4 kg/m^3

A continuación se muestra la relación entre la resistencia Peak y la Resistencia equivalente en la siguiente tabla.

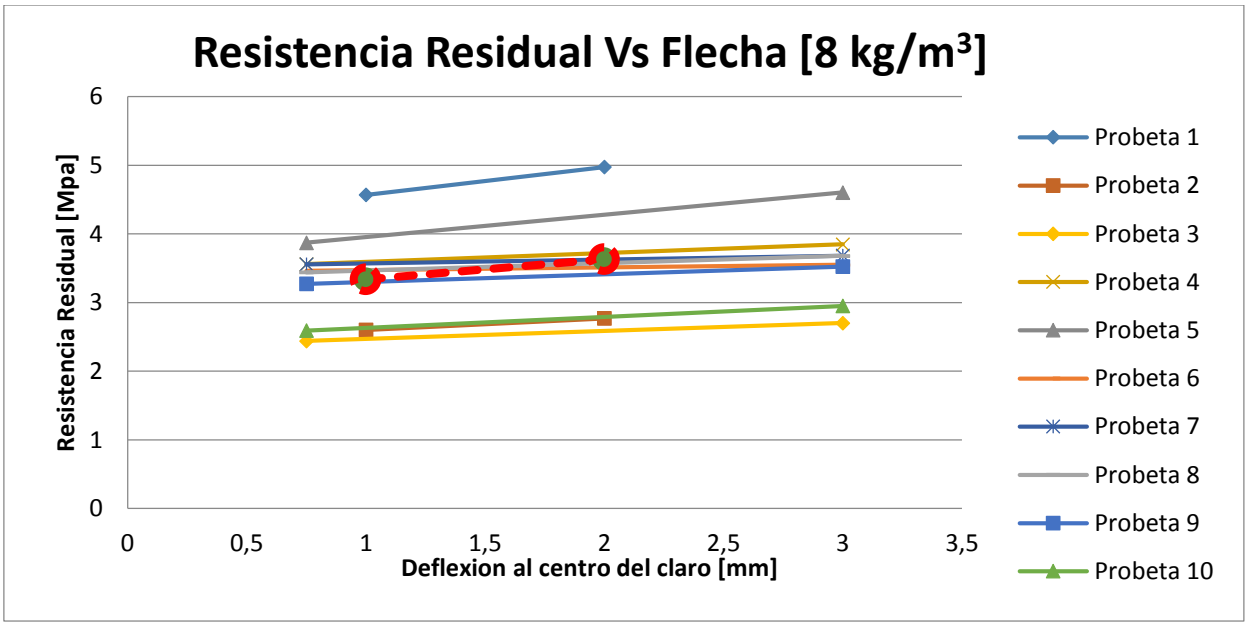
PROBETA	RDT_{150}	R_{peak}	RDT_{150}/R_{peak}
Probeta 1	1,401	3,770	0,372
Probeta 2	1,446	5,963	0,242
Probeta 3	0,983	3,588	0,274
Probeta 4	1,356	5,491	0,247
Probeta 5	1,531	5,014	0,305
Probeta 6	1,364	4,814	0,283
Probeta 7	1,715	4,037	0,425
Probeta 8	0,948	3,906	0,243
Probeta 9	1,211	3,842	0,315
Probeta 10	1,233	4,089	0,302
PROMEDIO	**1,319**	**4,451**	**0,301**
Coeficiente de Variación	**±0,178**	**±0,183**	**±0,20**

Tabla 17, relación entre la resistencia Peak y la Resistencia equivalente

Finalmente se agregan los resultados obtenidos de las muestras con dosificación de fibra de 8 kg/m³.

RESISTENCIAS RESIDUALES en [MPa] según deflexión en L/600 y L/150						
PROBETA	**0,75 [mm]**	**3 [mm]**	**Tenacidad**	**RDT_{150}**	**R_{peak}**	**RDT_{150}/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**
Coeficiente de Variación	**±0,203**	**±0,211**	**±0,240**	**±0,240**	**±0,197**	**±0,149**

Tabla 18, resumen de resultados para 8 kg/m³



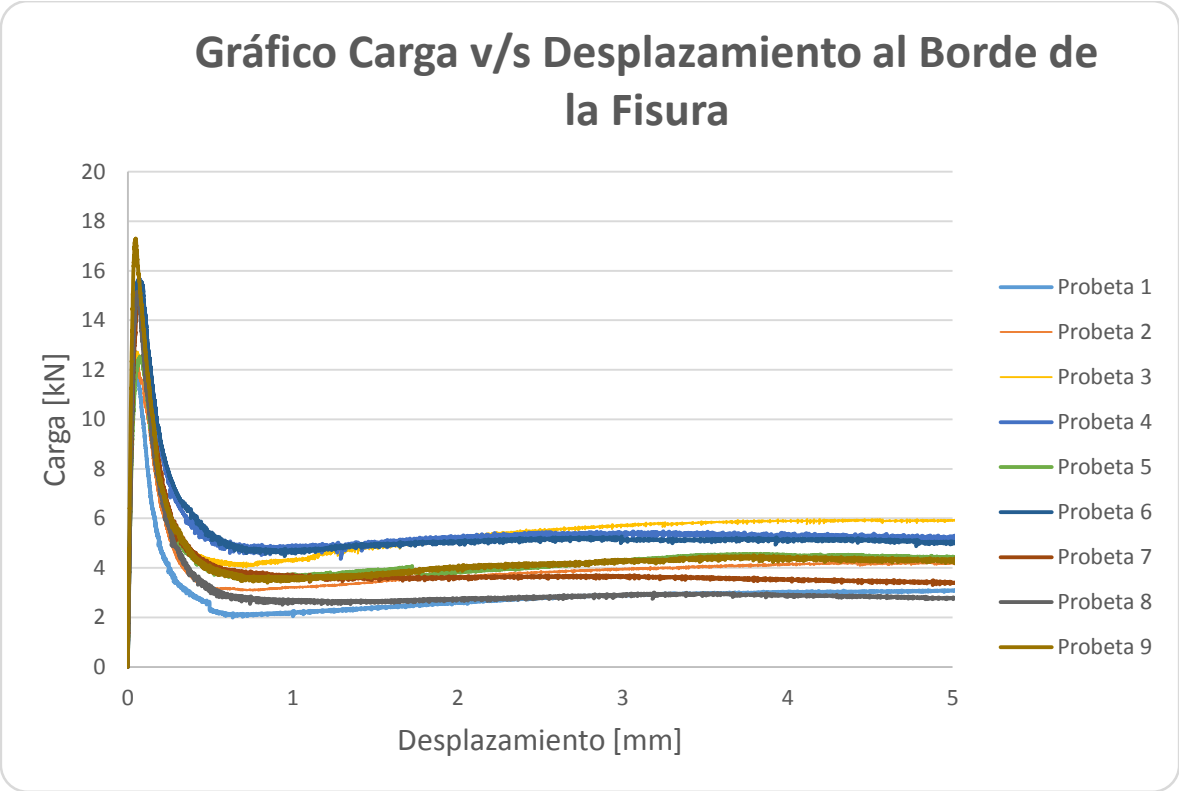
Grafica 04, Resistencia Residual vs Flecha fibra sintética 4 [kg/m³].

Al comparar los resultados de ambas dosificaciones, se observa que ambas se comportan de forma similar, pero al doblar la dosis de fibra, se obtienen resultados mucho más definidos y se identifica de mejor manera el aporte a la resistencia que realiza la fibra sintética.

Norma EN-14651.

Una vez realizado el ensayo con entalle y carga central a diferentes muestras, se eligen 9 probetas de manera aleatoria, a las cuales se le realiza el análisis descrito en la sección de normas de esta memoria.

A continuación se presenta la gráfica 05 la cual muestra los resultados obtenidos mediante este ensayo, es importante mencionar que estos resultados obtenidos se les debieron realizar ciertas correcciones, de esta forma se obtienen datos objetivos para realizar el análisis.

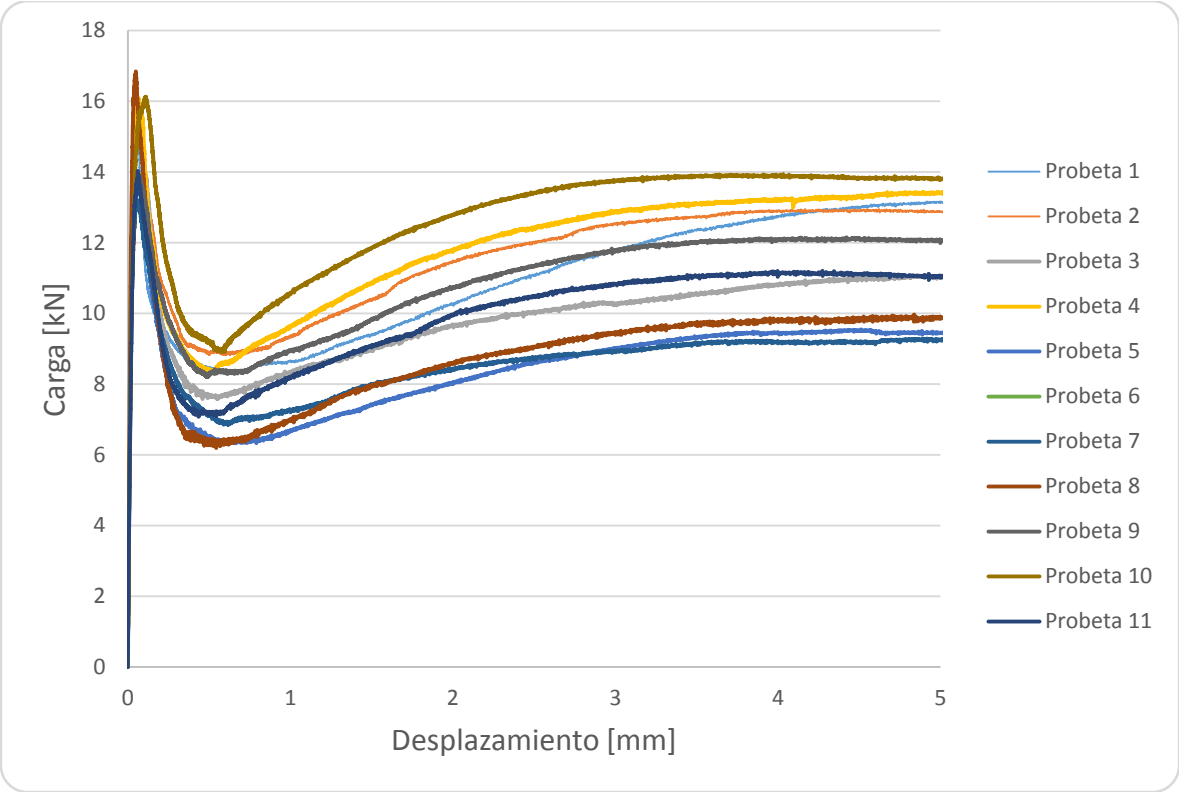


Grafica 05, Resumen de resultados 4 kg/m^3, Carga vs Desplazamiento al borde de la fisura según normativa EN-14651

Como se puede observar de la gráfica resumen se puede identificar tres comportamientos en las probetas. En un primer tramo se observa una pendiente pronunciada ascendente, la cual muestra el comportamiento a la flexión de estas, si bien existe una clara dispersión entre los resultados, todas las muestras presentan el mismo comportamiento hasta llegar a un peak, este peak es la resistencia máxima del hormigón hasta llegar al punto de agrietamiento.

El segundo tramo muestra una curva con una brusca pendiente negativa, la cual es producto de la fragilidad del hormigón. El tercer y último tramo muestra una pequeña recuperación, la cual es la resistencia aportada por las fibras.

Antes de pasar al análisis de esta norma se presenta la gráfica 06, la cual muestra los resultados de 11 probetas bajo las cuales se confeccionaron bajo los mismos parámetros y condiciones, la única diferencia es que estas presentan 8 kg/m^3 de la misma fibra sintética.



Grafica 06, Resumen de resultados 8 Kg/m^3, Carga vs Desplazamiento al borde de la fisura según normativa EN-14651

En la Tabla 18, se muestran los datos obtenidos de carga Fj correspondientes a cada valor de CMODj en [kN], con los cuales se procederá a realizar el análisis que estipula la norma.

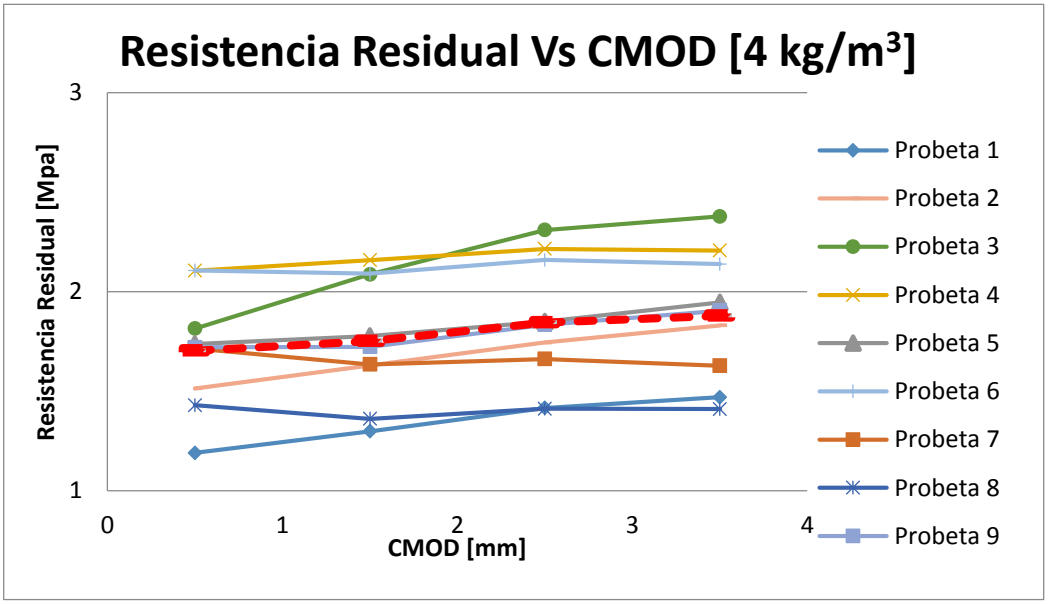
CARGA según distintos valores de CMOD en [kN]				
PROBETA	**0,5**	**1,5**	**2,5**	**3,5**
Probeta 1	2,156	2,495	2,861	3,03
Probeta 2	3,168	3,528	3,889	4,159
Probeta 3	4,108	4,959	5,655	5,869
Probeta 4	5,019	5,183	5,36	5,334
Probeta 5	3,868	3,993	4,217	4,517
Probeta 6	5,021	4,971	5,187	5,12
Probeta 7	3,798	3,545	3,632	3,526
Probeta 8	2,906	2,692	2,849	2,844
Probeta 9	3,815	3,822	4,168	4,39
PROMEDIO	**3,762**	**3,910**	**4,202**	**4,310**
Coeficiente de Variación	**±0,248**	**±0,250**	**±0,245**	**±0,241**

Tabla 19, valores de carga para distintos CMOD

Con los datos de carga anteriormente expuestos, se determinan los valores resistencia residual para cada uno de los datos, a continuación en la tabla 19, se indican los datos obtenidos de resistencia residual para cada CMOD y se adjunta la gráfica de los datos obtenidos.

RESISTENCIA RESIDUAL en [MPa] según distintos valores de CMOD en [mm]				
PROBETA	**0,5**	**1,5**	**2,5**	**3,5**
Probeta 1	0,690	0,798	0,916	0,970
Probeta 2	1,014	1,129	1,244	1,331
Probeta 3	1,315	1,587	1,810	1,878
Probeta 4	1,606	1,659	1,715	1,707
Probeta 5	1,238	1,278	1,349	1,445
Probeta 6	1,607	1,591	1,660	1,638
Probeta 7	1,215	1,134	1,162	1,128
Probeta 8	0,930	0,861	0,912	0,910
Probeta 9	1,221	1,223	1,334	1,405
PROMEDIO	**1,204**	**1,251**	**1,345**	**1,379**
Coeficiente de Variación	**±0,248**	**±0,250**	**±0,245**	**±0,241**

Tabla 20, valores de Resistencia Residual para distintos CMOD.



Grafica 06.: Resistencia Residual vs CMOD fibra sintética 4 [kg/m3].

La tendencia de la fibra polimérica para la mayoría de los casos ensayados es a aumentar la resistencia residual a medida aumenta el valor de CMOD. Existe un claro aumento significativo en los tres primeros CMODj a excepción de la probeta numero 8 la cual parte con un descenso y manifiesta una recuperación entre el $CMOD_2$ al $CMOD_3$, siendo regular para la mayoría de los casos 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

La resistencia residual en $CMOD_4$, obtiene un valor máximo en la probeta número 3 siendo está de 1,878 [MPa] y con una media de las 9 muestras ensayadas de 1,379 [MPa].

Otro dato importante con respecto a los datos obtenidos es al compararlos a la Norma EN 14889-2, 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, no es suficiente para alcanzar una resistencia residual en CMOD1 promedio de 1,5 [MPa] ya que el valor que se obtuvo es de 1,2 [MPa]. En cuanto a CMOD4 = 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 1,2 superando el 1[MPa] expuesto en esta norma.

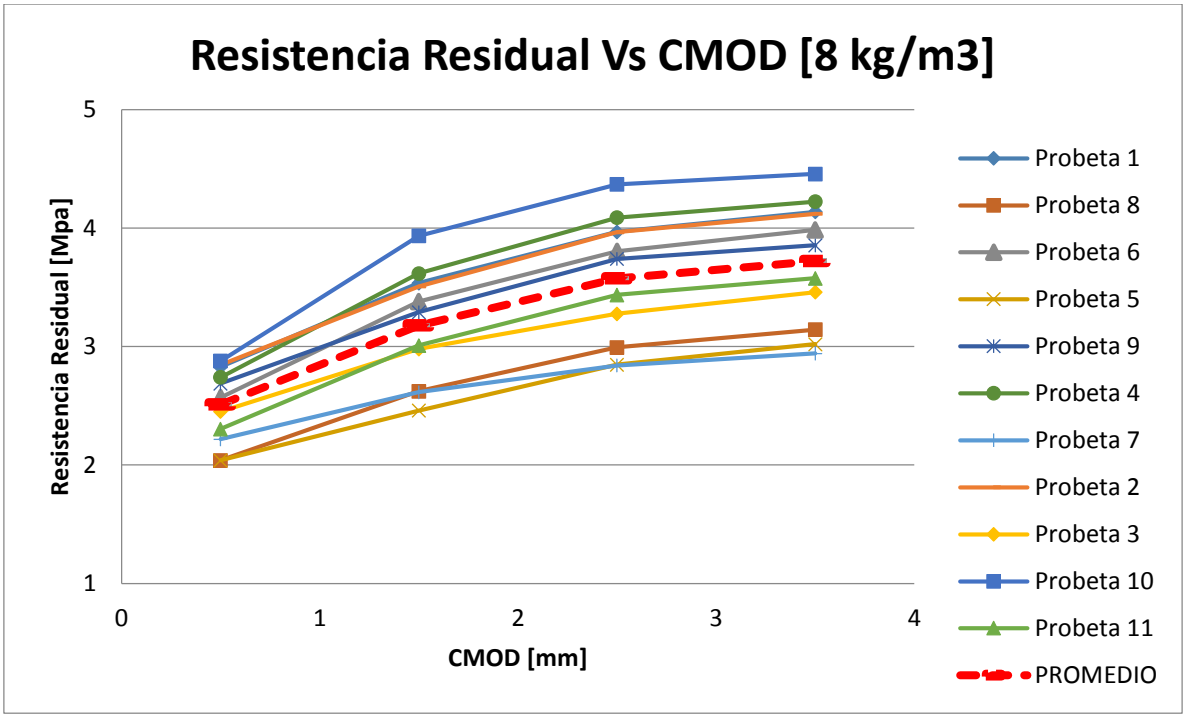
Finalmente se agregan los resultados obtenidos de las muestras con dosificación de fibra de 8 KG/m^3.

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**
Coeficiente de Variación	**±0,128**	**±0,151**	**±0,149**	**±0,142**

Tabla 21, valores de carga para distintos 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**
Coeficiente de Variación	**0,128**	**0,151**	**0,149**	**0,142**

Tabla 22, valores de Resistencia Residual para distintos CMOD.



Grafica 07.: Resistencia Residual vs CMOD fibra sintética 8 [kg/m3].

Finalmente se exponen en las siguientes Tablas los El Resumen de los Resultados de los Ensayos Normados.

RESUMEN NORMA ASTM C 1609 [4 kg/m3]		
Resistencia Residual L/600 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
1,537	0,918	1,247
Resistencia Residual L/150 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
2,062	0,988	1,433
Tenacidad L/150 [Joule]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
38,577	21,341	29,673
Resistencia Residual Equivalente L/150 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
1,715	0,983	1,319

Tabla 23, Resumen Norma ASTM.

RESUMEN NORMA ASTM C 1609 [8 kg/m3]		
Resistencia Residual L/600 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
4,570	2,440	3,337
Resistencia Residual L/150 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
4,975	2,702	3,692
Tenacidad L/150 [Joule]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
103,35	52,014	72,559
Resistencia Residual Equivalente L/150 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
4,593	2,312	3,225

Tabla 24, Resumen Norma ASTM.

RESUMEN NORMA EN 14651 [4 kg/m3]		
Carga CMOD 0,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
5,021	2,156	3,762
Carga CMOD 1,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
5,183	2,495	3,910
Carga CMOD 2,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
5,655	2,849	4,202
Carga CMOD 3,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
5,869	2,844	4,310

Tabla 25, Resumen Norma Europea.

RESUMEN NORMA EN 14651 [4 kg/m3]		
Resistencia Residual CMOD 0,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
1,607	0,690	1,204
Resistencia Residual CMOD 1,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
1,659	0,798	1,251
Resistencia Residual CMOD 2,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
1,810	0,912	1,345
Resistencia Residual CMOD 3,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
1,878	0,910	1,379

Tabla 26, Resumen Norma Europea.

RESUMEN NORMA EN 14651 [8 kg/m3]		
Carga CMOD 0,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
8,996	6,373	7,842
Carga CMOD 1,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
12,295	7,687	9,929
Carga CMOD 2,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
13,651	8,871	11,172
Carga CMOD 3,5 [kN]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
13,927	9,194	11,624

Tabla 27, Resumen Norma Europea.

RESUMEN NORMA EN 14651 [8 kg/m3]		
Resistencia Residual CMOD 0,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
2,879	2,039	2,509
Resistencia Residual CMOD 1,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
3,934	2,460	3,171
Resistencia Residual CMOD 2,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
4,368	2,841	3,575
Resistencia Residual CMOD 3,5 [MPa]		
Máxima	**Mínima**	**Promedio**
4,457	2,942	3,720

Tabla 28, Resumen Norma Europea.

CONCLUSION

A modo general, es importante destacar que para la realización de este tipo de investigaciones se debe realizar un estudio previo minucioso para la selección de los materiales a utilizar, para esto se deben realizar diferentes tipos ensayo a los materiales que se emplearan bajo la normativa vigente, de esta manera se obtiene un resultado final optimo y confiable.

Es importante destacar que para la confección de las probetas se debe tener especial cuidado con la limpieza de los moldajes, para esto se deben abrir los moldes y utilizar espátula para eliminar cualquier tipo de residuos que puedan encontrarse en estos, además, una vez limpios se tiene que aplicar la cantidad necesaria de desmoldante. Por otro lado, para evitar problemas con la geometría de la muestra, previo al llenado de las probetas; se colocan todos los moldajes y se nivelan, de tal forma que se eviten problemas producto del llenado.

Otro aspecto relevante es el curado del hormigón, se deben esperar 28 días antes de ensayar, en los cuales el hormigón entra a una cámara húmeda, de esta manera se evitan apariciones de grietas producto de la perdida de agua durante los 28 días.

La relevancia de estos ensayos es principalmente la información que otorgan, ya que con estos datos se toman como base a la hora de realizar un diseño; finalmente esto se traduce netamente en costos, ya que la idea es obtener el mayor beneficio al menor costo posible.

Con respecto a los ensayos, es importante confeccionar más probetas de las que se utilizaran para la realización de este proceso, ya que de esta manera se puede practicar con los equipos de ensayo, de esta forma se puede identificar los posibles problemas que puedan provocar que los resultados obtenidos no sean los reales, para esto se debe revisar la geometría de la muestra, centrar la probeta, verificar la luz del ensayo con respecto a los rodillos, revisar los parámetros que emplearán en el equipo antes de comenzar cada ensayo, finalmente comprobar que los transductores funcionen de la manera correcta.

Con respecto al ensayo ASTM C-1609, se cumplen con los objetivos planteados a esta memoria, ya que los resultados obtenidos se pueden considerar fiables, de esta forma las características del hormigón reforzado con bajas cuantías de fibra sintética (4 Kg/m^3) son las que se exponen en la tabla 23, mientras que las de 8 Kg/m^3 se observan en la tabla 24.

Al realizar una comparación entre los resultados obtenidos para cada uno de los casos se observa que en términos generales al duplicar la cantidad de fibra se mejora considerablemente el comportamiento del hormigón ante los esfuerzos a los que se exponen, mejorándolas características prácticamente en un 300%.

Continuando con la norma europea EN-14651, al igual que en el caso anterior se cumplen con los objetivos de esta investigación, caracterizando el hormigón con de 4 Kg/m^3 de fibra con los datos mostrados en las tablas 25 y 26, mientras que los datos obtenidos para la dosificación de 8 Kg/m^3 son

Al realizar una comparación entre ambas dosificaciones se observa que al igual que en la norma anterior existe un aumento tanto en la carga soportada como en las resistencias residuales de las probetas prismáticas de 8 Kg/m^3 de fibra sintética, este aumento de las características de los

HRF con 8 Kg/m^3 de fibra es prácticamente el doble para cada CMOD, lo cual comprueba que entre mayor dosis de fibra mejor será el comportamiento del hormigón ante los esfuerzos a Flexotracción.

Sintetizando y observando los resultados y en conjunto con las gráficas de esta experiencia, se concluye que el hormigón es un elemento frágil, quedando en evidencia por la conducta que tienen las muestras en ambos ensayos, pero al añadir fibras a la muestra da una recuperación al hormigón, siendo mucho más notorio en la dosificación de 8 Kg/m^3, quedando en evidencia al observar las tenacidades para ambas dosificaciones, lo cual podría permitir considerar como estructural para algunos casos a estos tipos de hormigones.

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 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-Reiforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
- Construcción y aplicaciones del HRF, Avances en tecnología del Hormigón. Ana Blanco, Diciembre 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 Unequalled in Usability, Durability and Service Performance. Product Info, Elasto Plastic Concrete 2013.
- Ficha Técnica Sika Viscocrete 5100 CL, Sika, Septiembre 2015.
- La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos. Julio Portella Montardo. Marzo 2005.
- Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón, Manual Técnico. MACCAFERRI. Noviembre 2007.

Anexo A.1.a

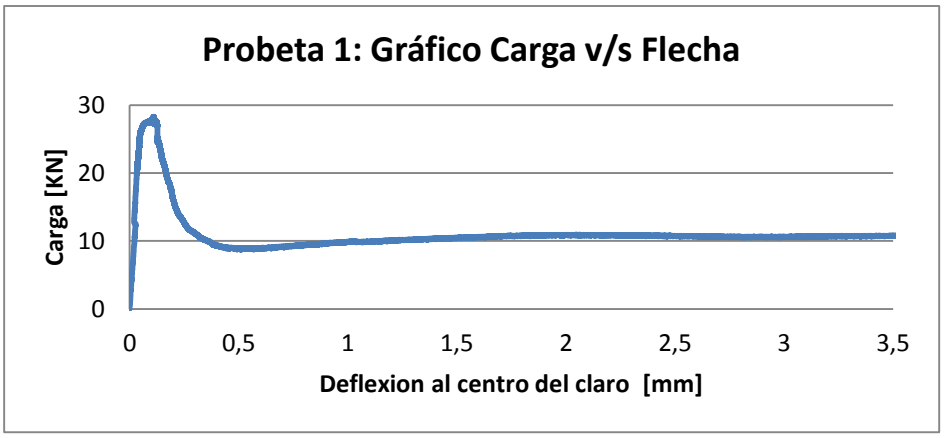


Grafico Carga v/s Flecha

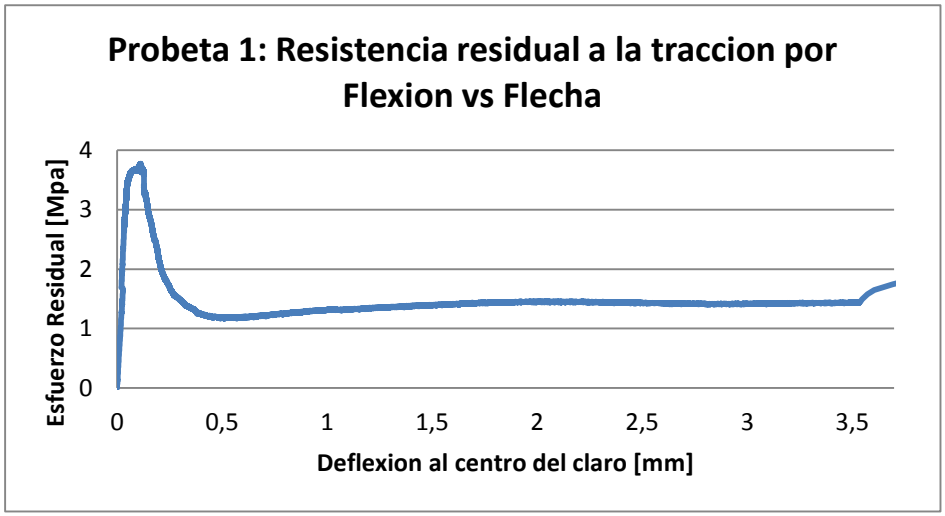


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

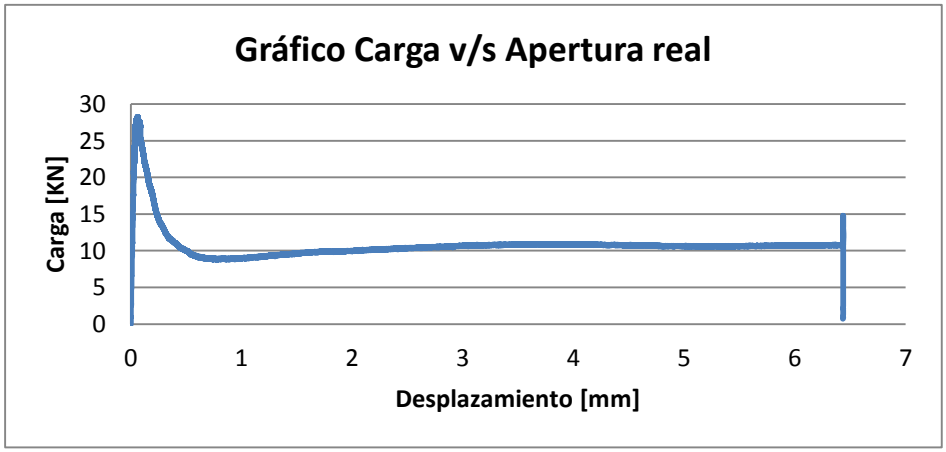


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.1.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	9,288	10,618

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,2384	1,41573333

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	9,23707273	31,5293429

Carga maxima [KN].	28,275
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,106

Desplazamiento Flecha total [mm].	6,707
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	0,869

Anexo A.2.a

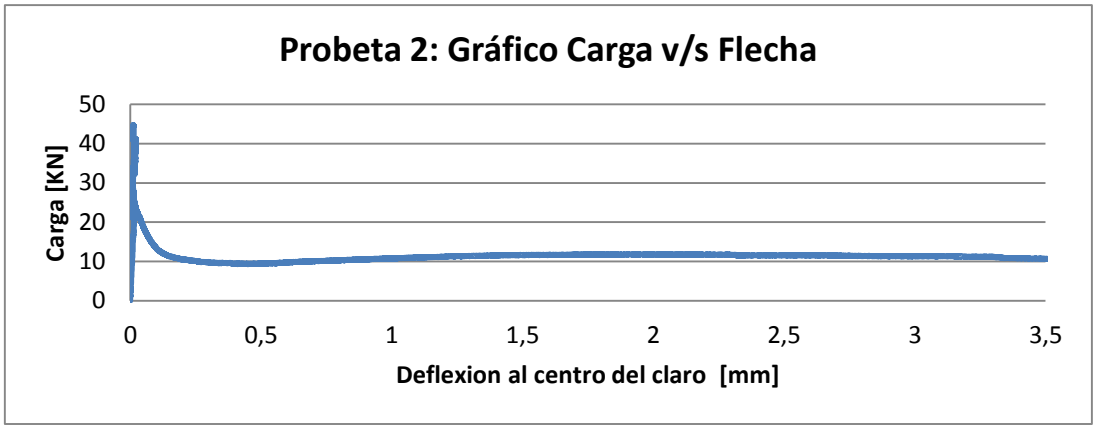


Grafico Carga v/s Flecha

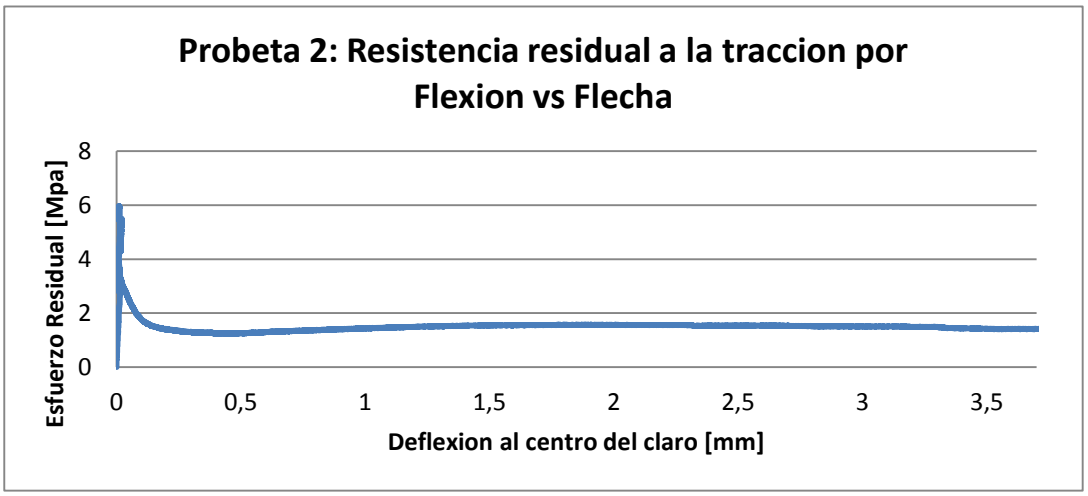


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

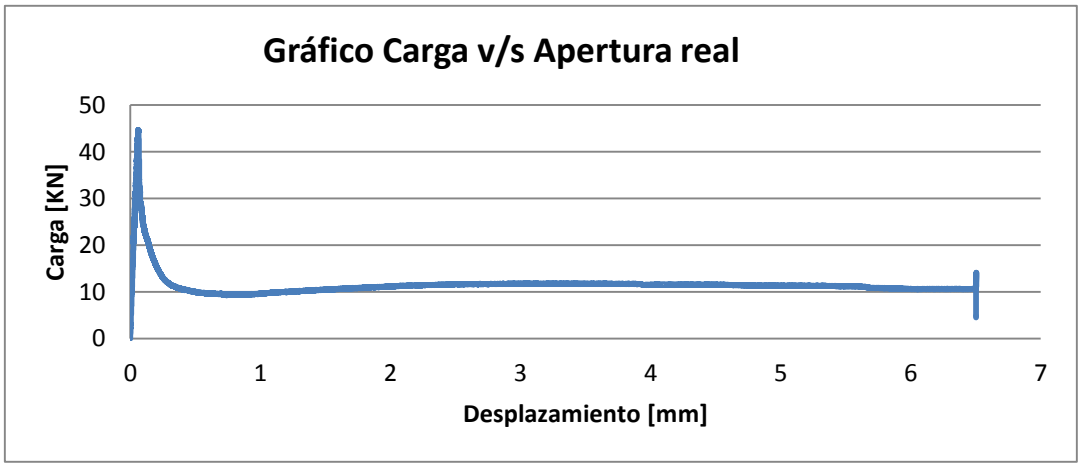


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.2.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	10,213	11,314

Carga maxima [KN].	44,703
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,011

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,36173333	1,50853333

Desplazamiento Flecha total [mm].	7,668
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	4,524

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	7,90604569	32,5297694

Anexo A.3.a

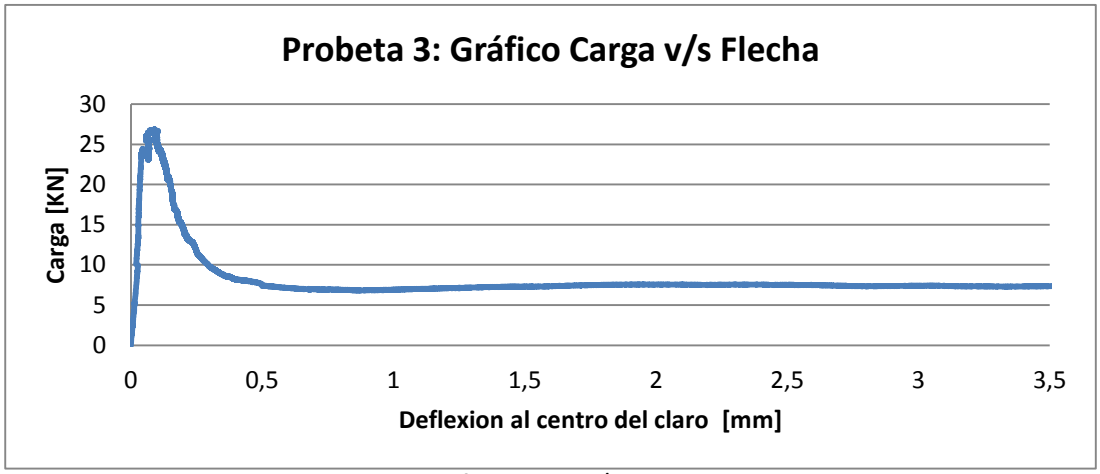


Grafico Carga v/s Flecha

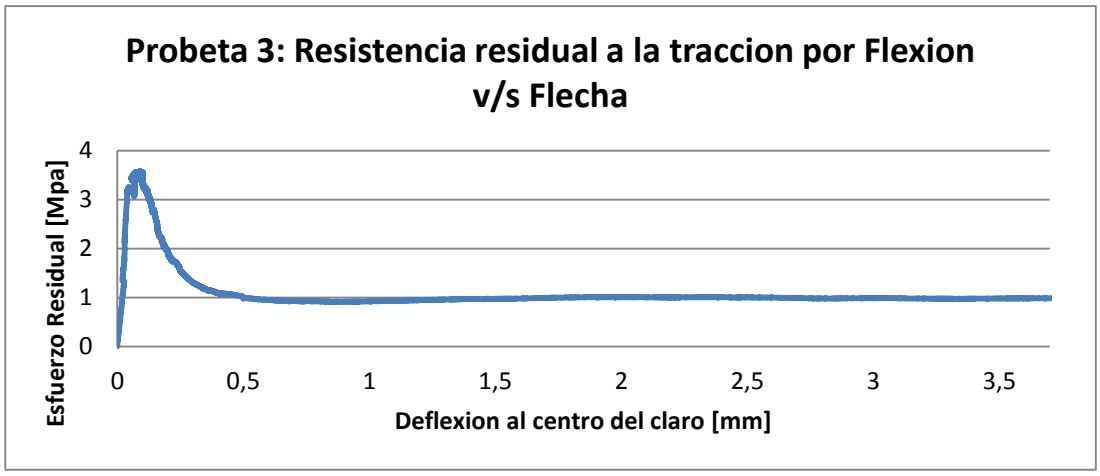


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

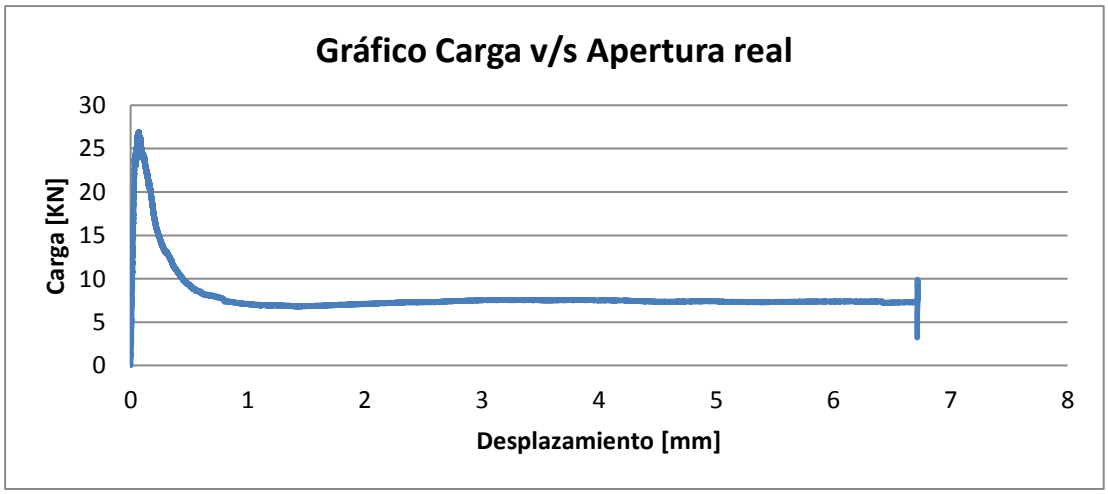


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.3.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	6,924	7,41

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	0,9232	0,988

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	7,54232473	22,110519

Carga máxima [KN].	26,908
Desplazamiento Flecha en carga máxima [mm].	0,079

Desplazamiento Flecha total [mm].	7,093
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	3,222

Anexo A.4.a

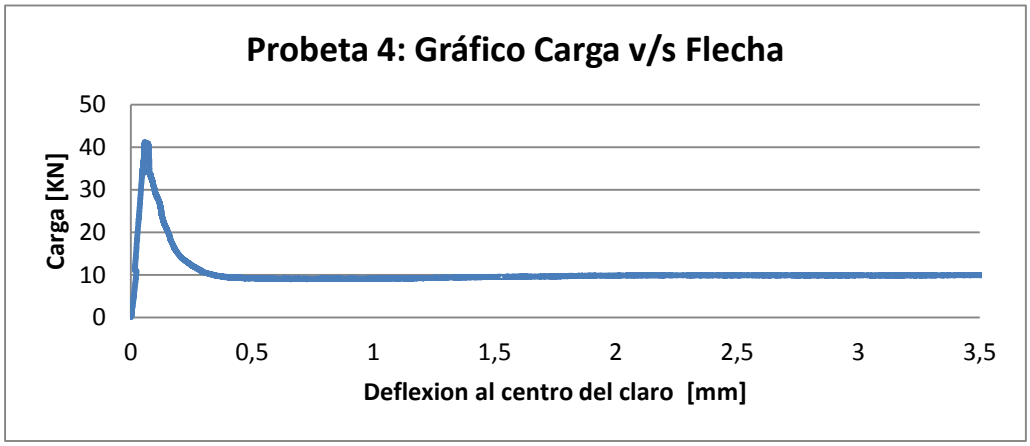


Grafico Carga v/s Flecha

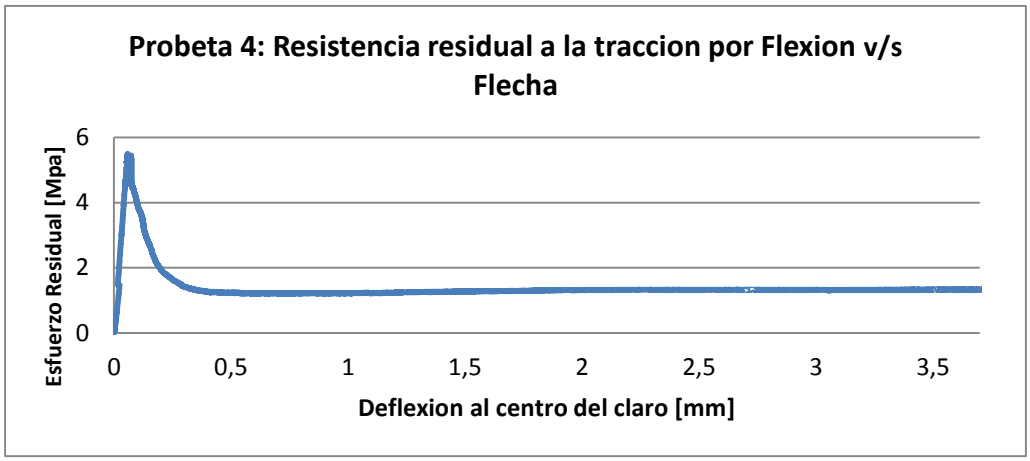


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

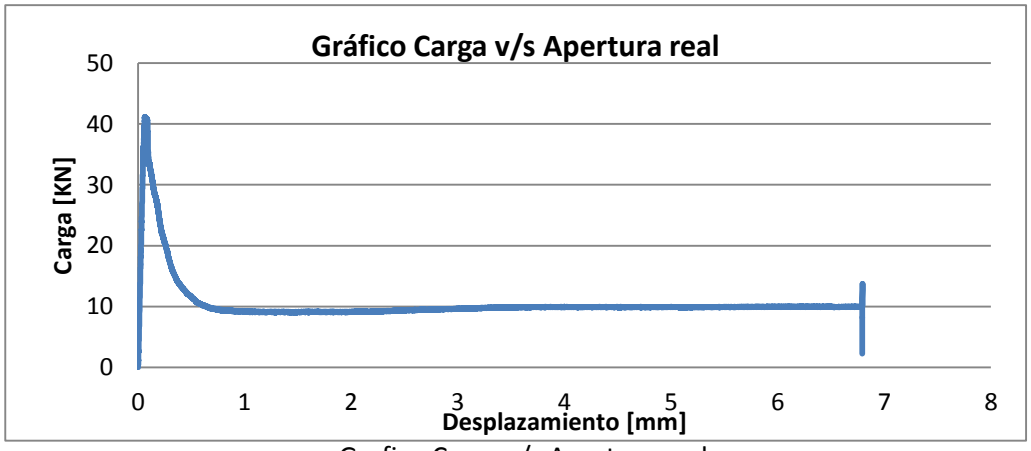


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.4.b

Resultados

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	9,067	9,899

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,20893333	1,31986667

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	9,74409537	30,5115138

Carga maxima [KN].	41,184
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,056

Desplazamiento Flecha total [mm].	8,046
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	2,799

Anexo A.5.a

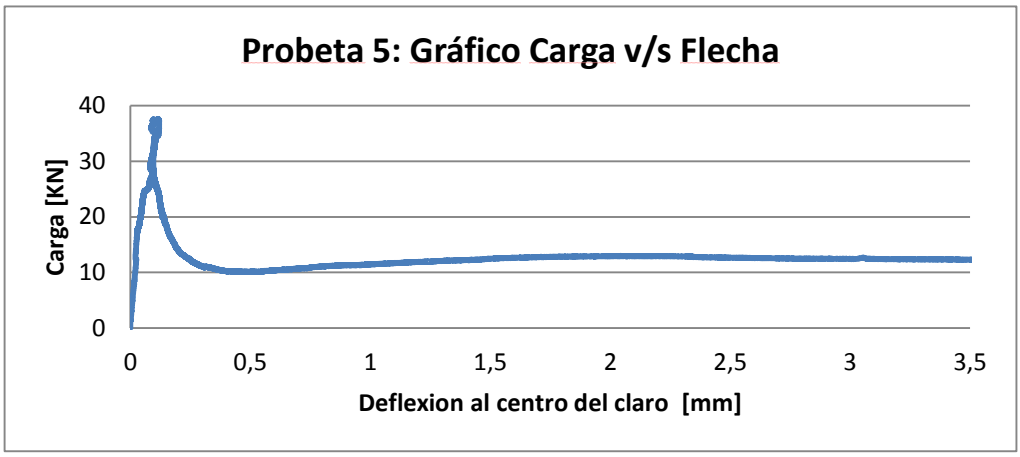


Grafico Carga v/s Flecha

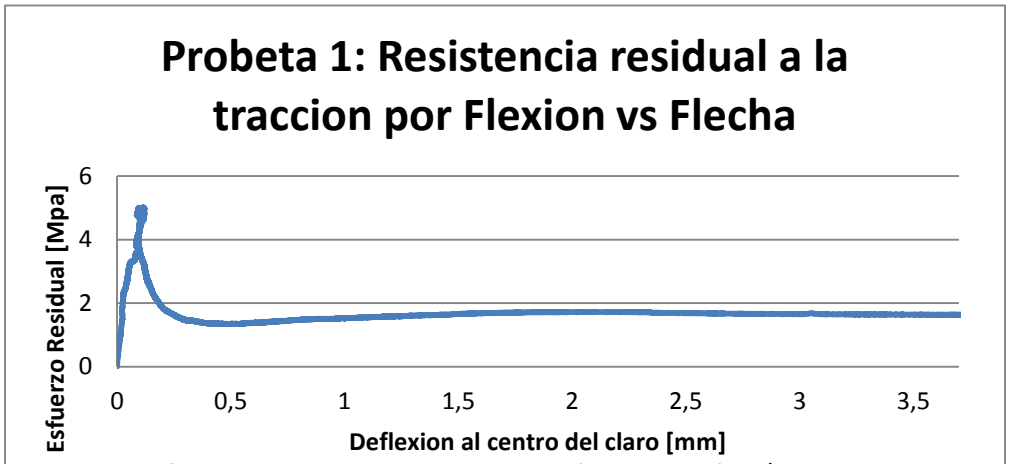


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

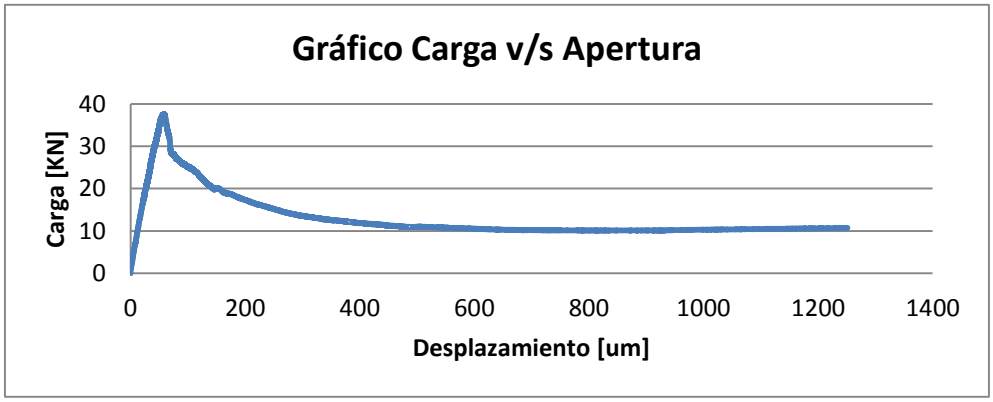


Grafico Carga v/s Apertura

Anexo A.5.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	10,885	12,411

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,45133333	1,6548

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	9,00400852	34,4525606

Carga maxima [KN].	37,608
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,105

Desplazamiento Flecha total [mm].	4,019
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	11,456

Anexo A.6.a

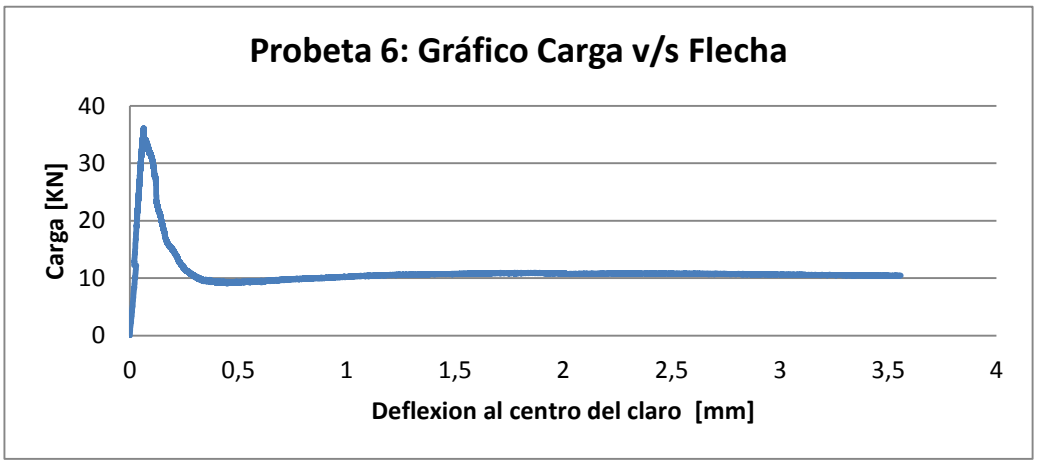


Grafico Carga v/s Flecha

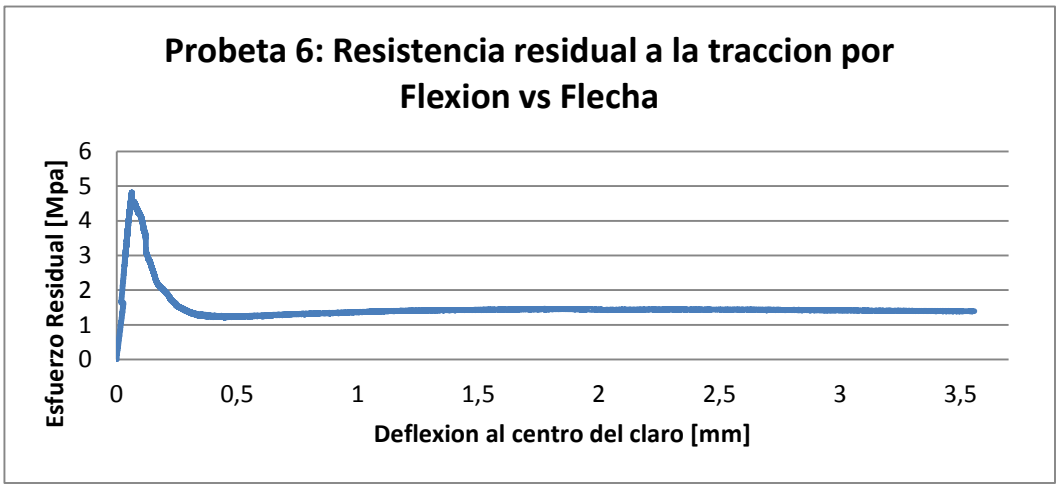


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Apertura

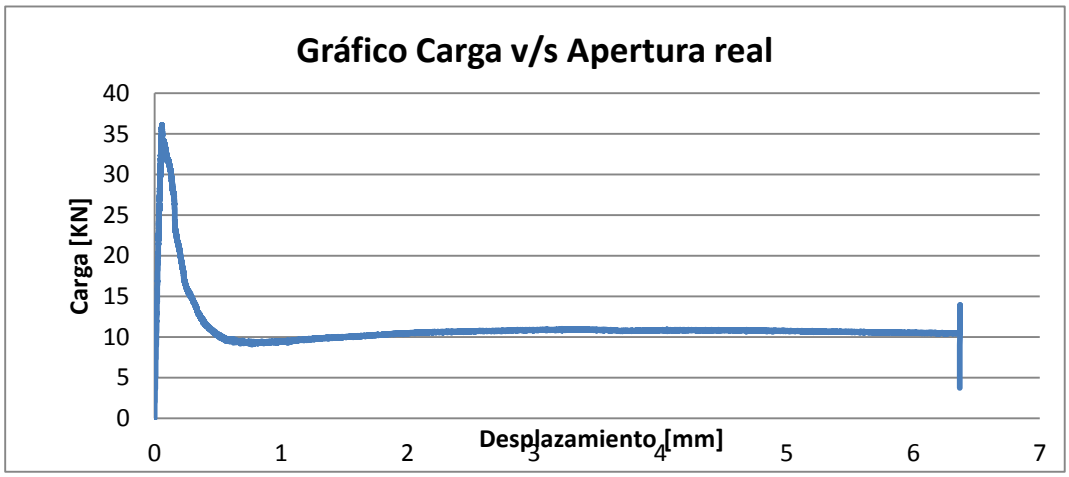


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.6.b

Resumen:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	9,865	10,62

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,31533333	1,416

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	8,97963488	30,6849153

Carga maxima [KN].	36,102
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,057

Desplazamiento Flecha total [mm].	6,996
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	3,704

Anexo A.7.a

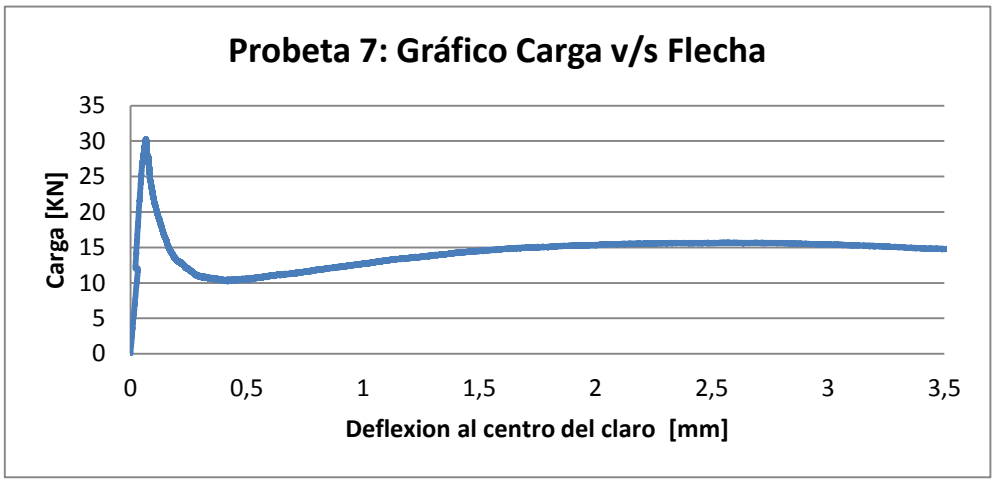


Grafico Carga v/s Flecha

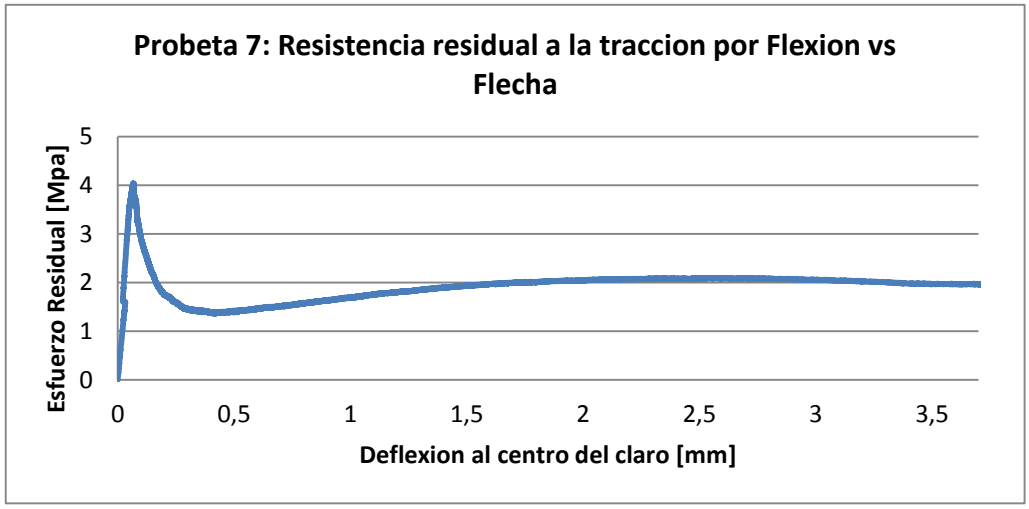


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

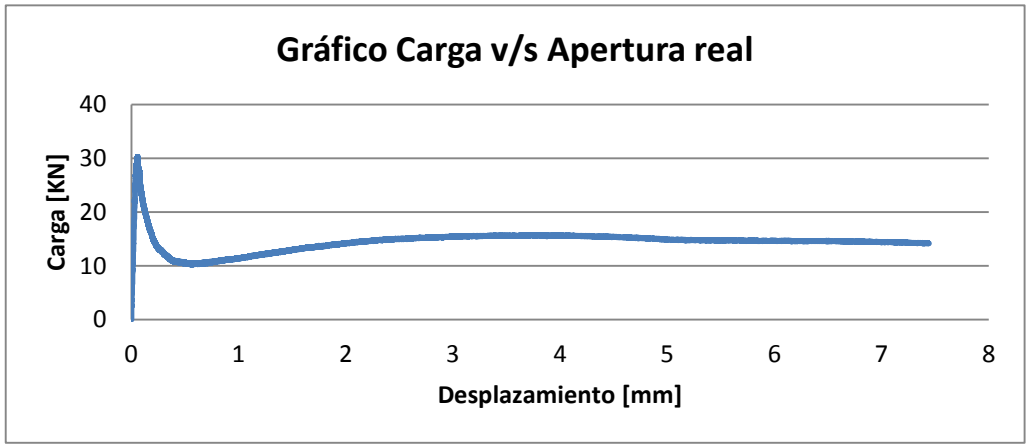


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.7.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	11,53	15,466

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,53733333	2,06213333

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	8,77285349	38,5768005

Carga maxima [KN].	30,277
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,059

Desplazamiento Flecha total [mm].	4,560
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	14,177

Anexo A.8.a

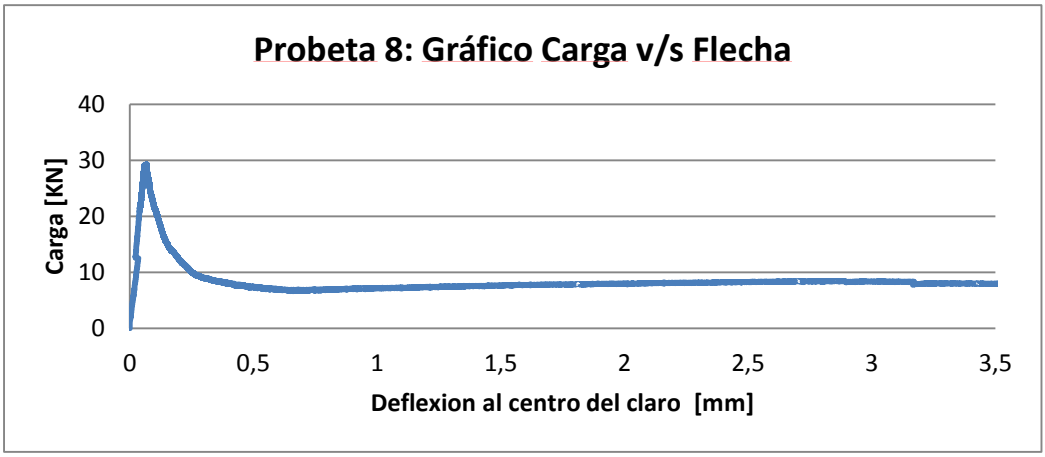


Grafico Carga v/s Flecha

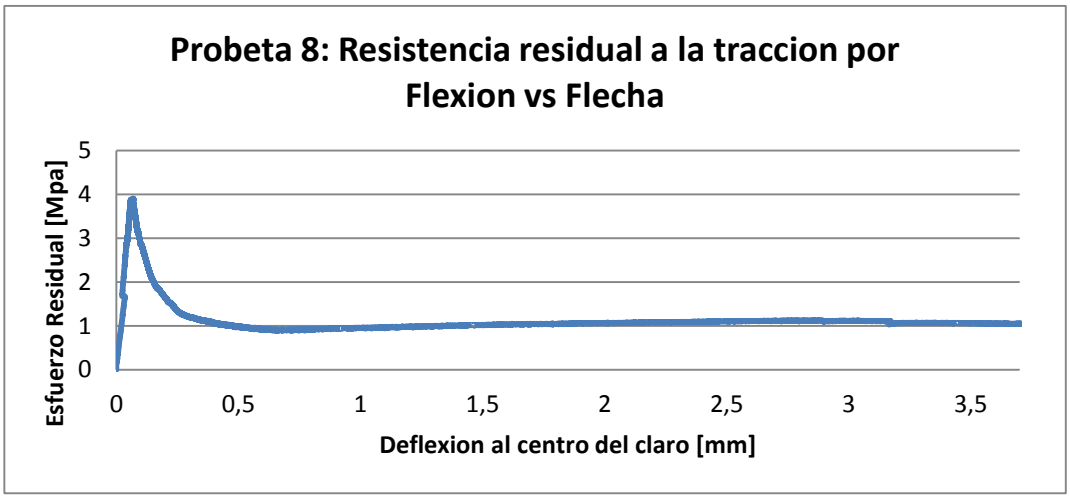


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

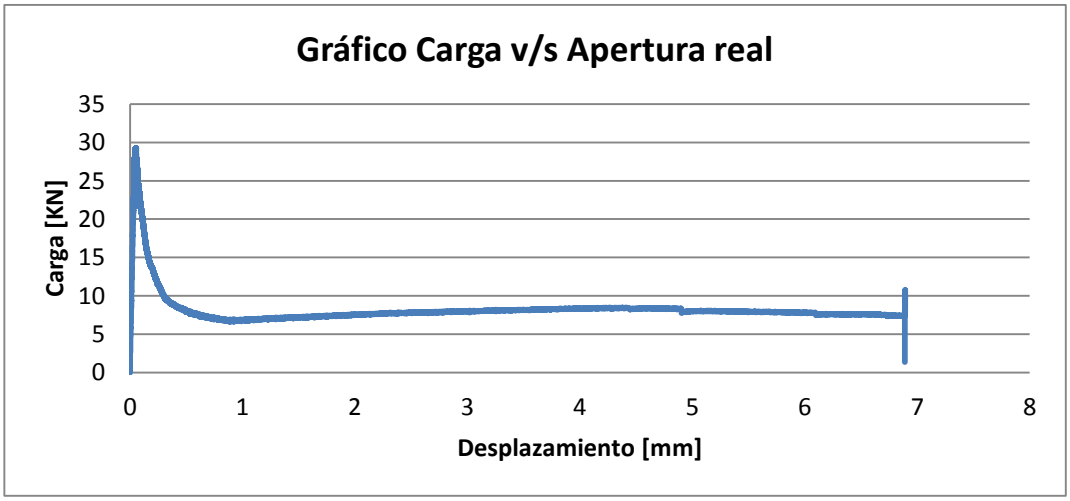


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.8.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	6,884	8,361

Carga maxima [KN].	29,295
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,057

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	0,91786667	1,1148

Desplazamiento Flecha total [mm].	7,826
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	1,819

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	6,59533787	21,3406445

Anexo A.9.a

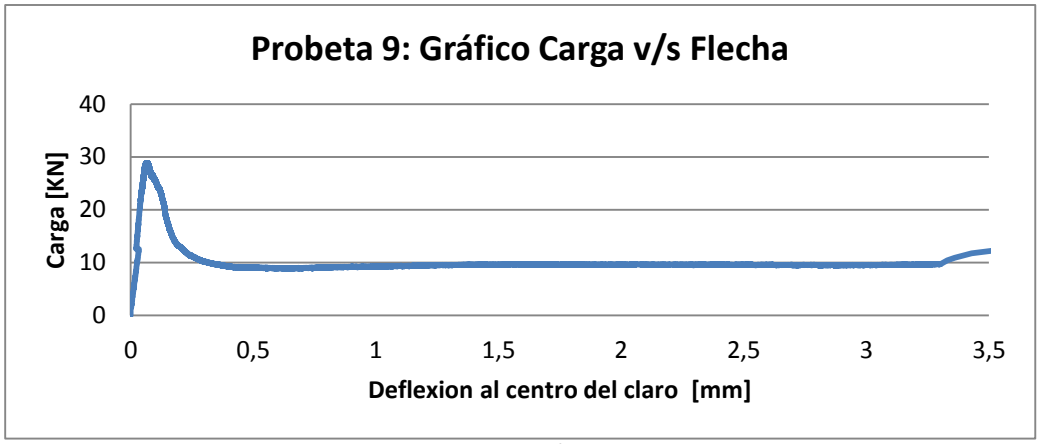


Grafico Carga v/s Flecha

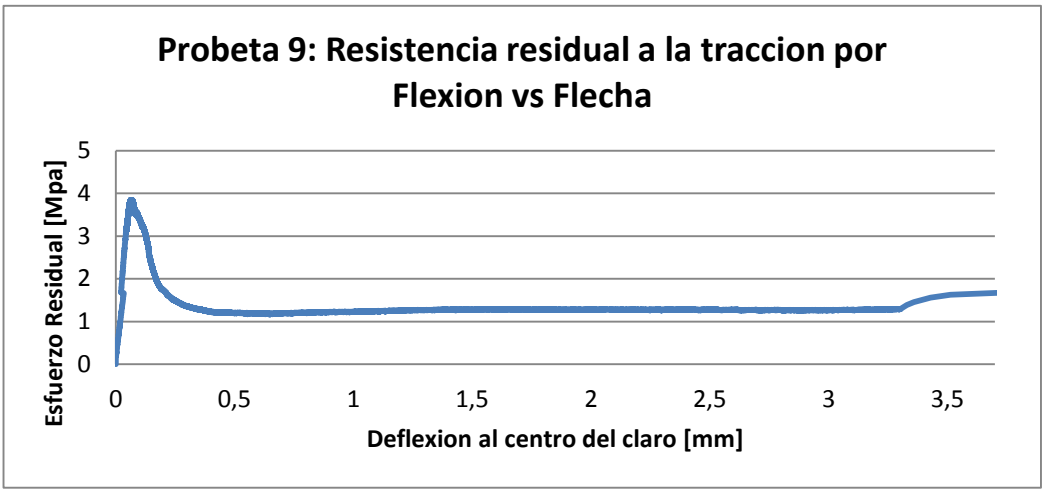


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

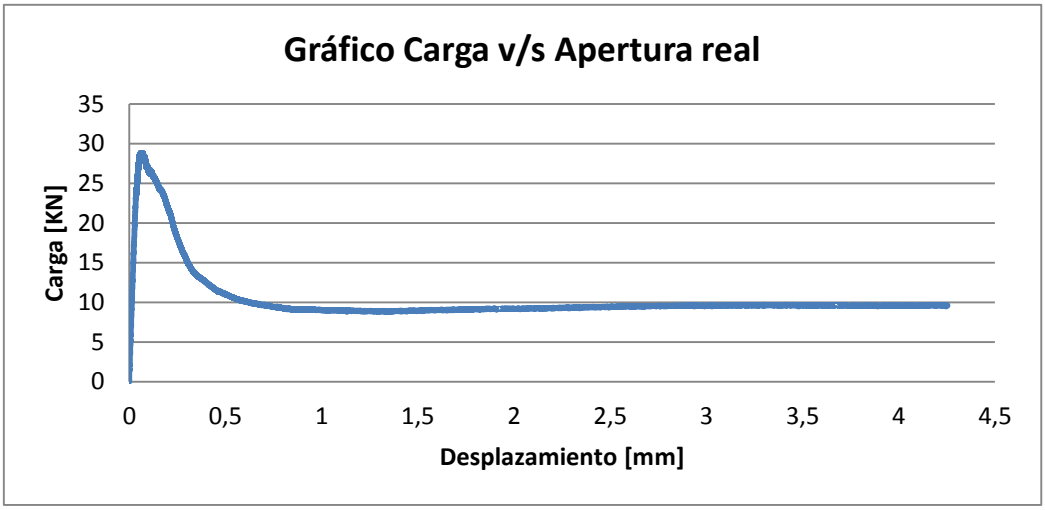


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.9.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	9,018	9,462

Carga maxima [KN].	28,816
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,056

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,2024	1,2616

Desplazamiento Flecha total [mm].	6,875
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	4,289

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	8,12317013	27,2490889

Anexo A.10.a

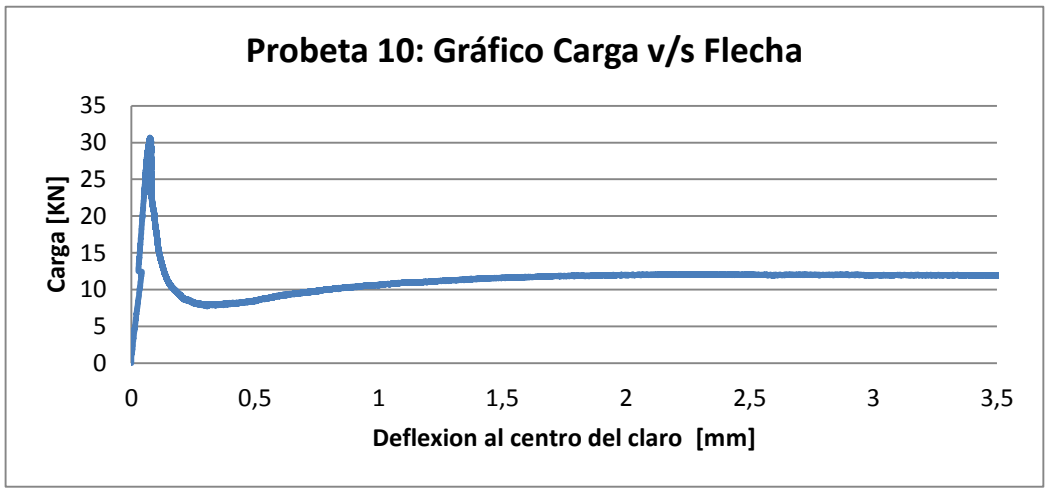


Grafico Carga v/s Flecha

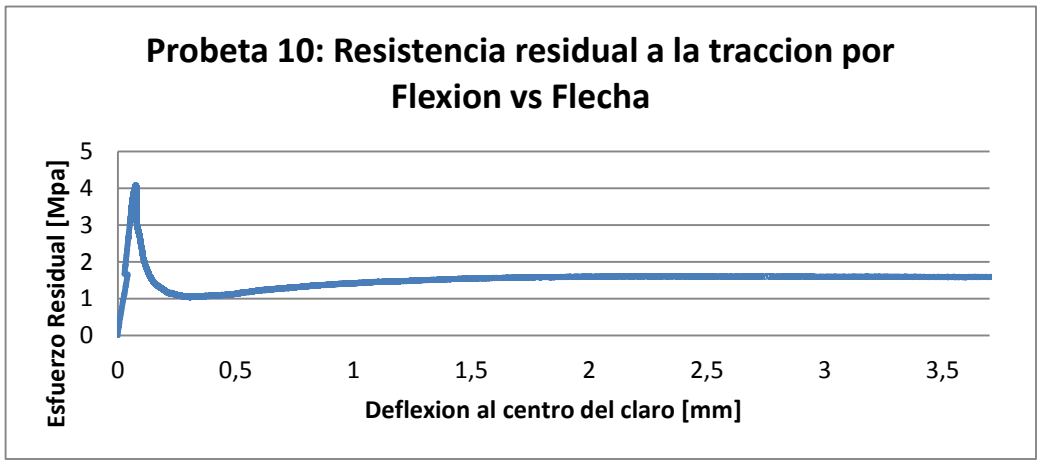


Grafico Resistencia residual a la tracción por Flexión v/s Flecha

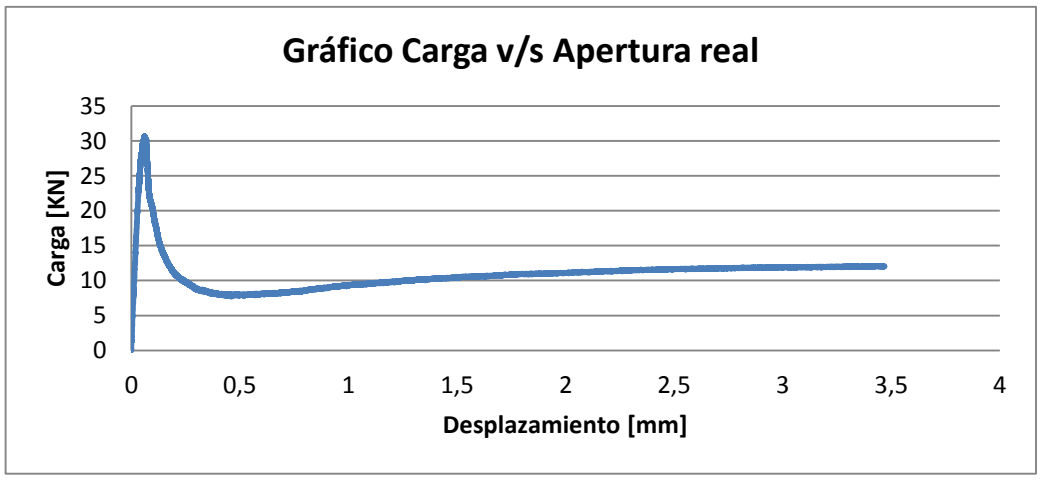


Grafico Carga v/s Apertura real

Anexo A.10.b

Resultados:

	Carga	
Flecha [mm]	0,75	3
KN	9,818	11,914

	RESISTENCIA RESIDUAL	
Flecha [mm]	0,75	3
Mpa	1,30906667	1,58853333

	TENACIDAD	
Flecha [mm]	0,75	3
Joule	6,32268721	27,7401773

Carga maxima [KN].	30,664
Desplazamiento Flecha en carga maxima [mm].	0,062

Desplazamiento Flecha total [mm].	4,290
Carga en el desplazamiento en Flecha total [KN].	10,320

Anexo B.1

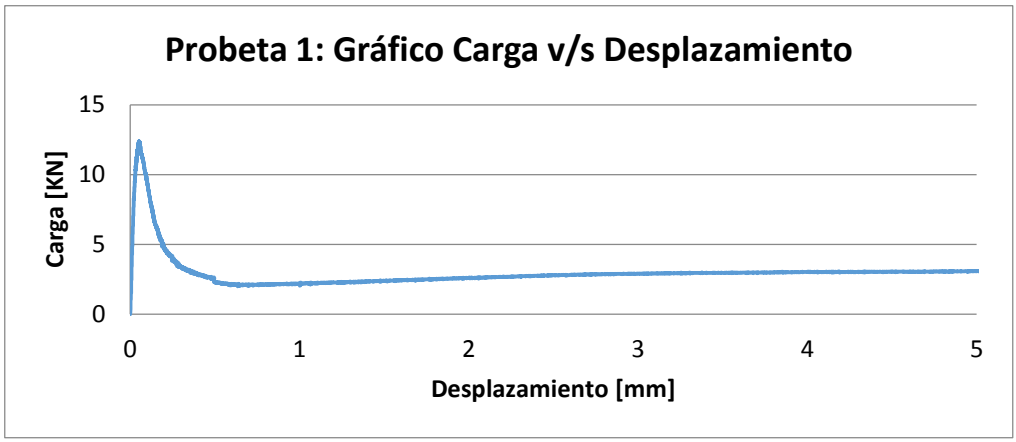
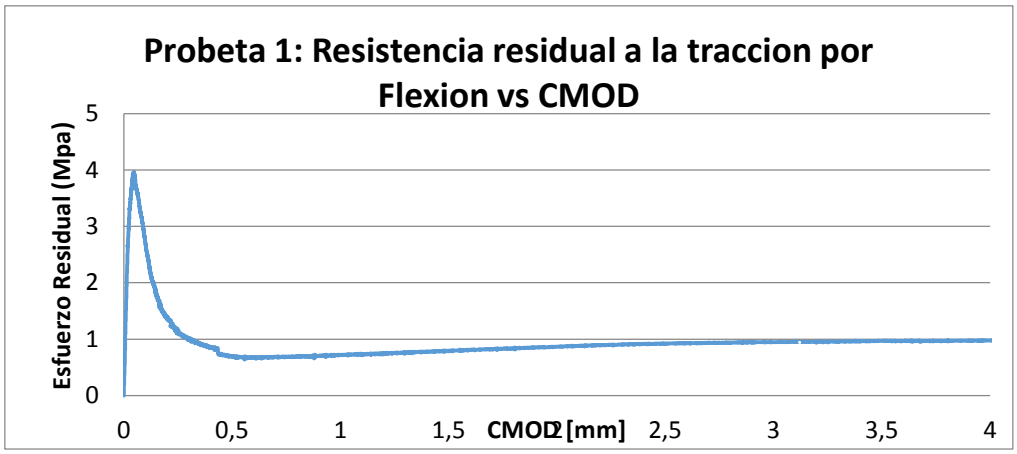


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	12,19	2,156	2,495	2,861	3,03

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	3,901	0,690	0,798	0,916	0,970

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,424	2,420	4,679	7,377	10,334

Carga maxima [KN].	12,376	Desplazamiento total [mm].	5,140
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,053	Carga en el desplazamiento total [KN].	3,081

Anexo B.2

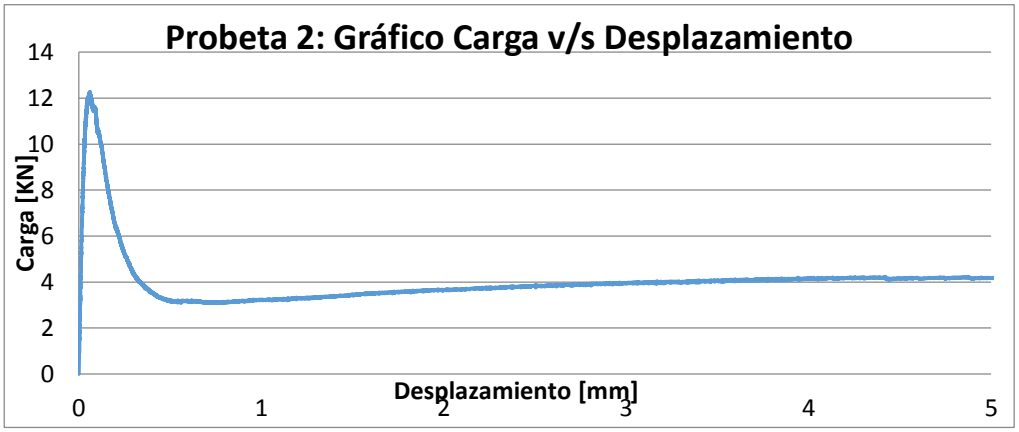
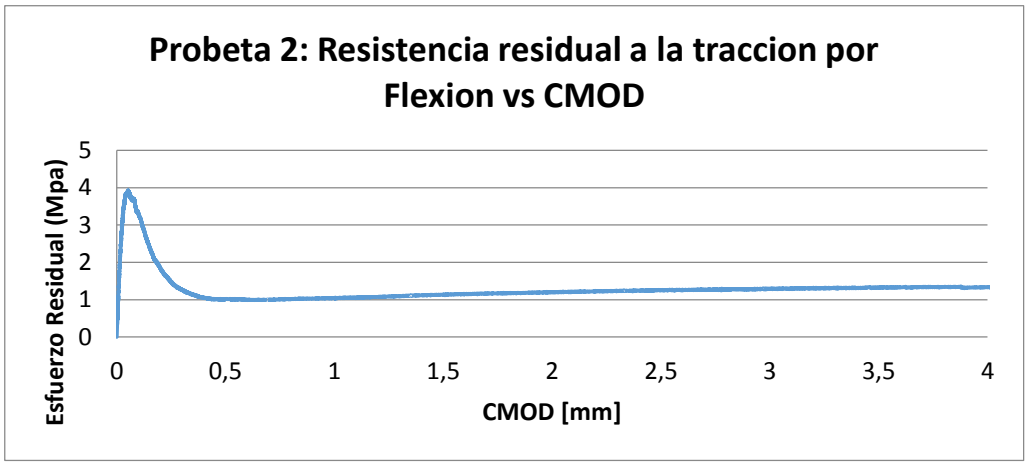


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	12,007	3,168	3,528	3,889	4,159

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	3,842	1,014	1,129	1,244	1,331

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,408	2,900	6,185	9,928	13,963

Carga maxima [KN].	12,281	Desplazamiento total [mm].	5,065
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,060	Carga en el desplazamiento total [KN].	4,179

Anexo B.3

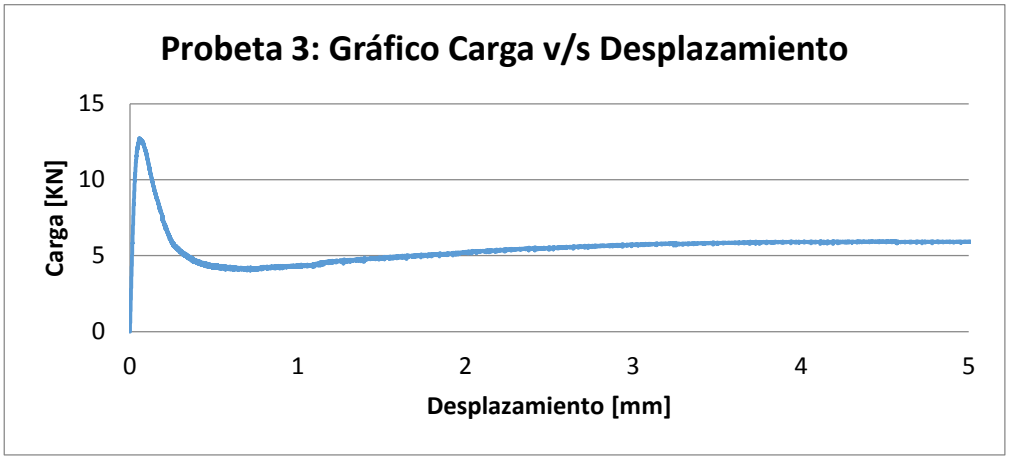
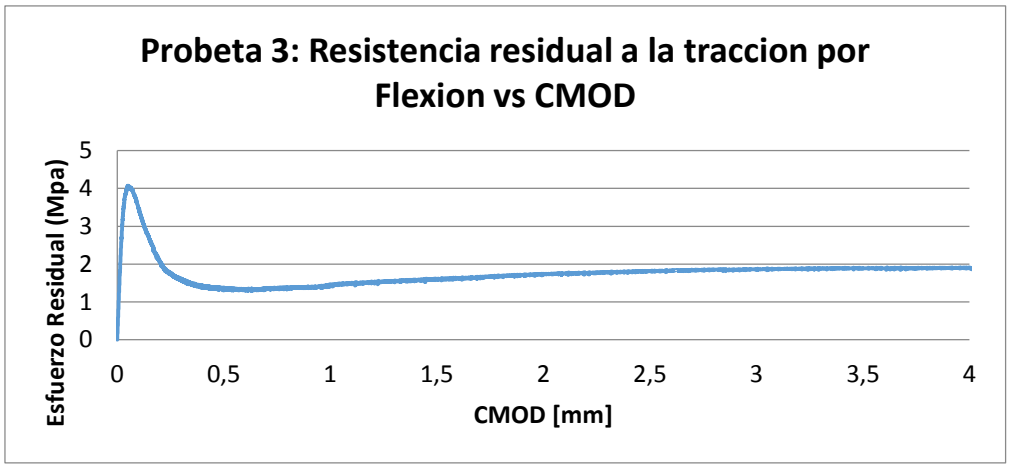


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	12,694	4,108	4,959	5,655	5,869

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	4,062	1,315	1,587	1,810	1,878

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,422	3,324	7,848	13,225	19,036

Carga maxima [KN].	12,731	Desplazamiento total [mm].	5,858
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,058	Carga en el desplazamiento total [KN].	5,781

Anexo B.4

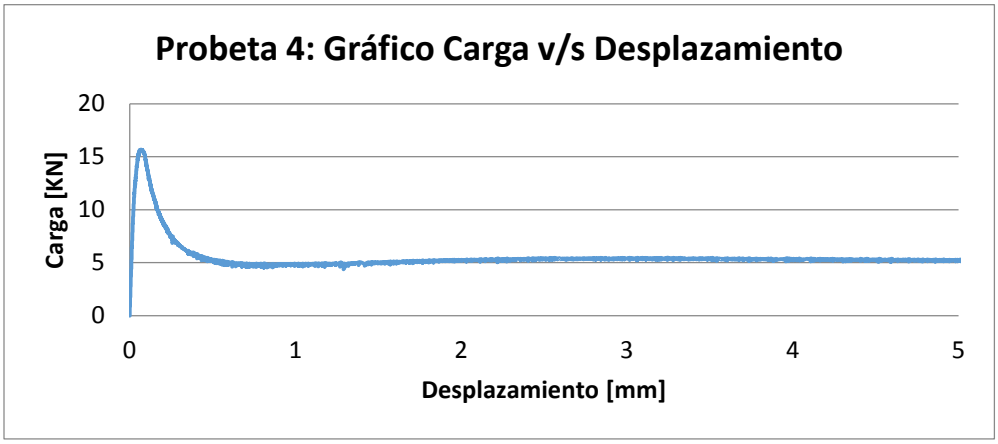
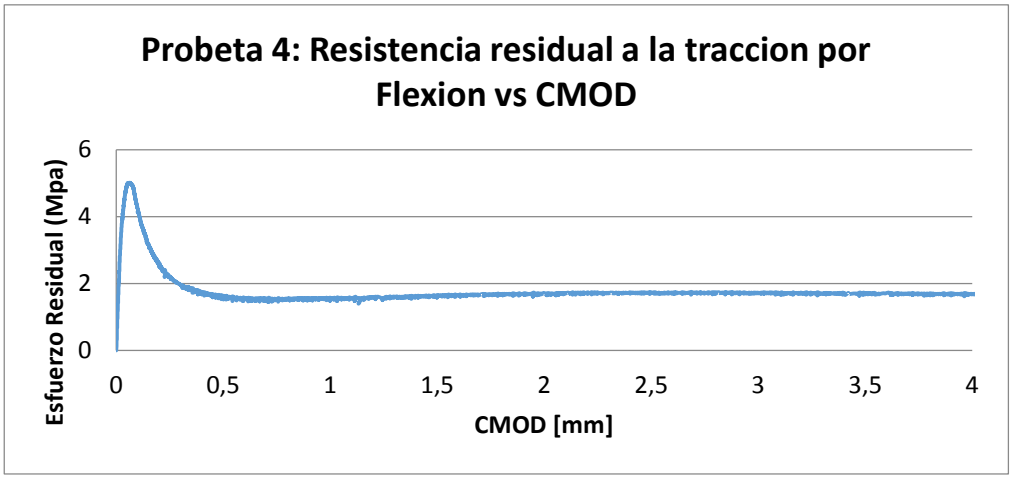


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	15,421	5,019	5,183	5,36	5,334

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	4,935	1,606	1,659	1,715	1,707

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,504	4,050	8,978	14,262	19,636

Carga maxima [KN].	15,664	Desplazamiento total [mm].	5,535
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,068	Carga en el desplazamiento total [KN].	5,098

Anexo B.5

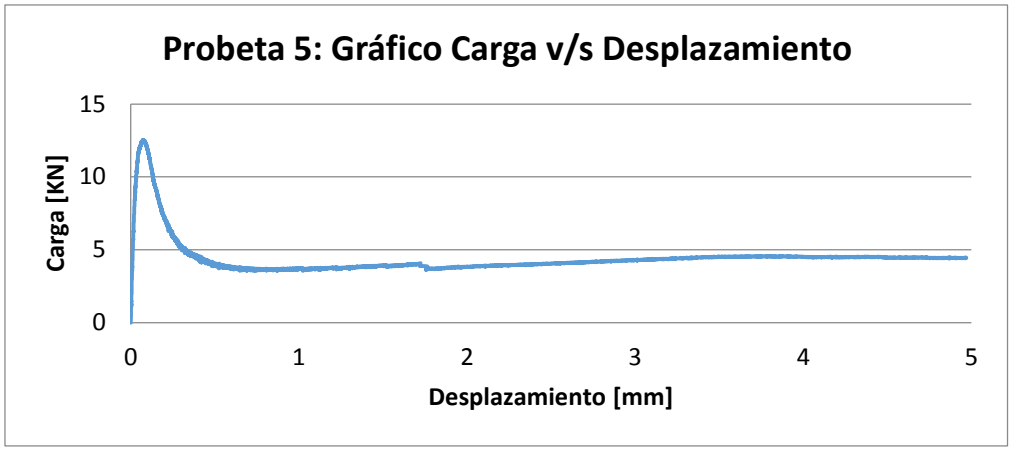
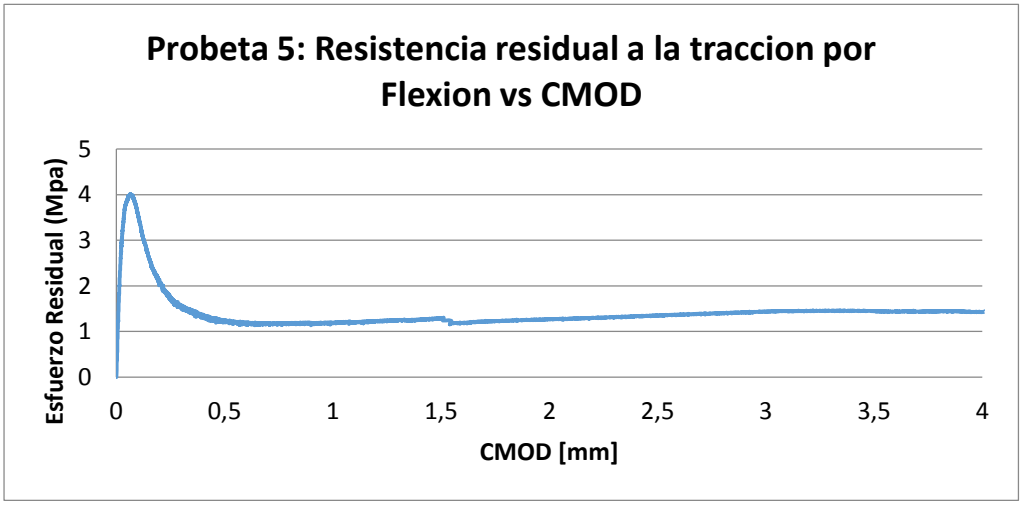


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	12,113	3,868	3,993	4,217	4,517

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	3,876	1,238	1,278	1,349	1,445

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,410	3,256	7,036	10,993	15,433

Carga maxima [KN].	12,528	Desplazamiento total [mm].	5,223
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,073	Carga en el desplazamiento total [KN].	4,409

Anexo B.6

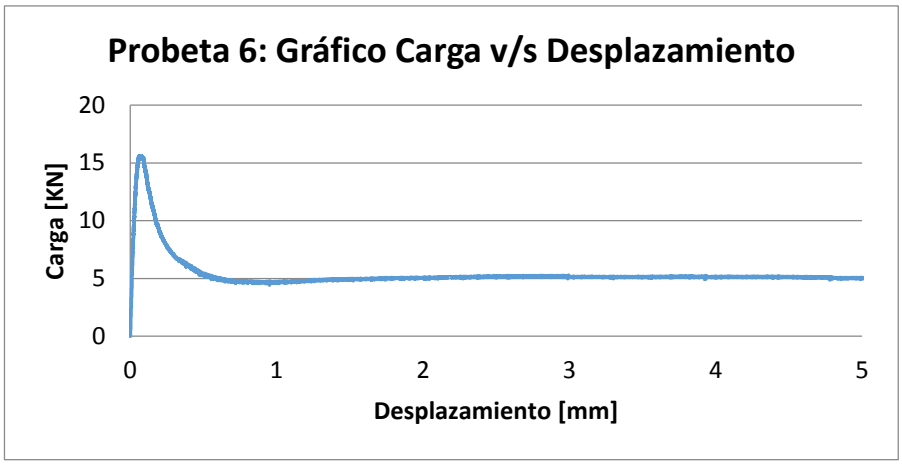
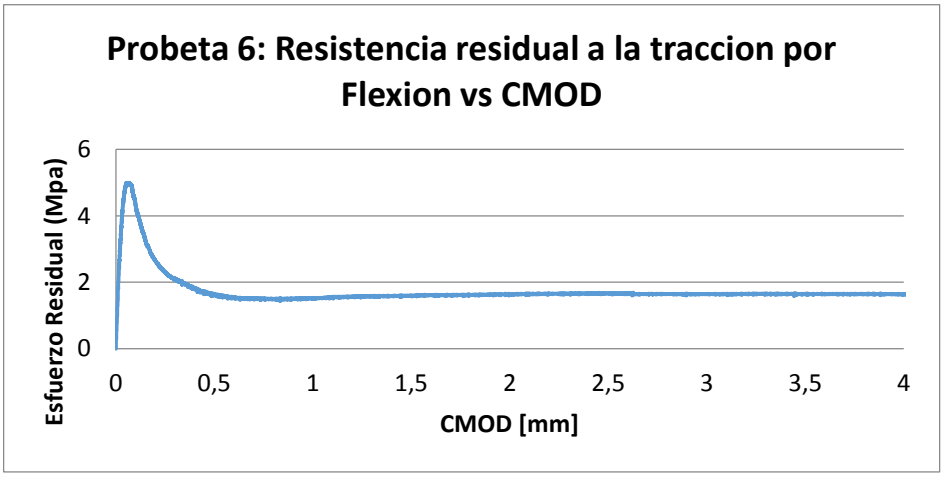


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	15,32	5,021	4,971	5,187	5,12

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	4,902	1,607	1,591	1,660	1,638

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,479	4,151	8,976	14,077	19,222

Carga maxima [KN].	15,588	Desplazamiento total [mm].	5,105
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,061	Carga en el desplazamiento total [KN].	4,946

Anexo B.7

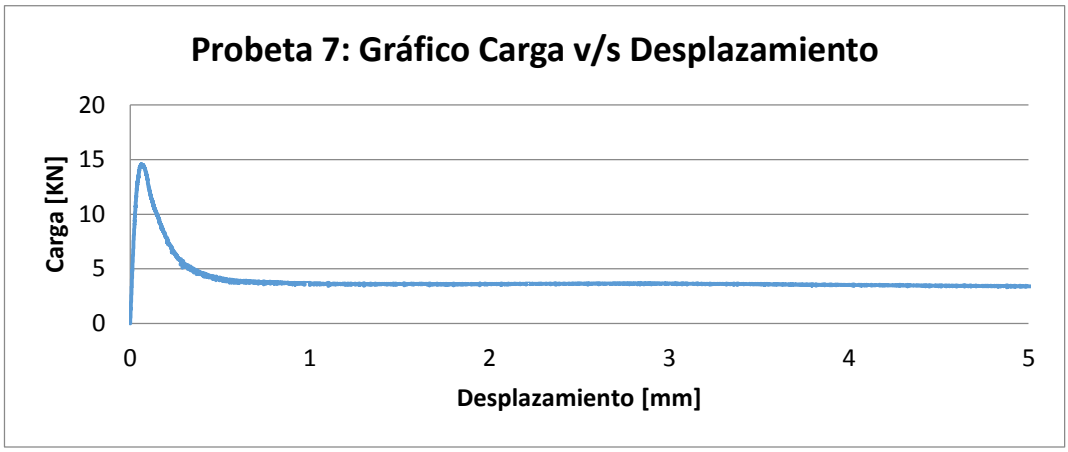
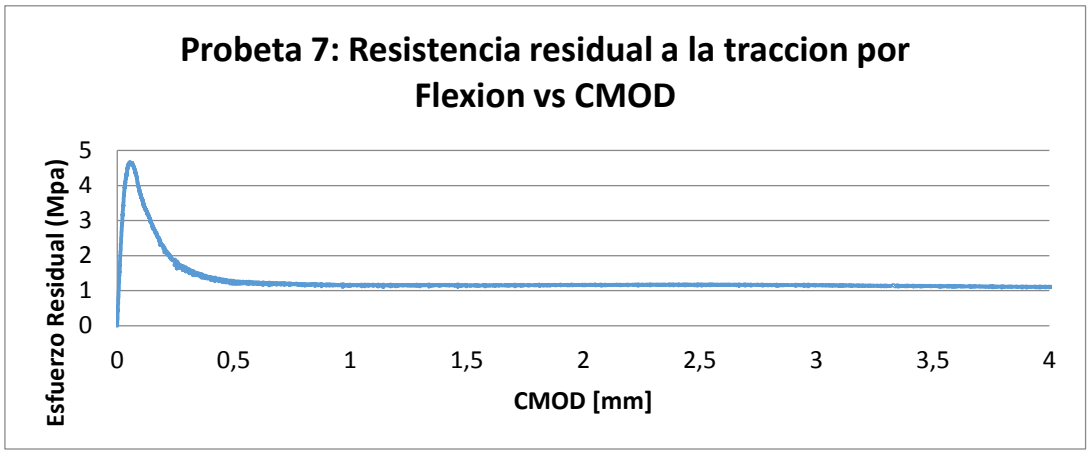


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	14,312	3,798	3,545	3,632	3,526

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	4,580	1,215	1,134	1,162	1,128

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,462	3,488	7,182	10,813	14,419

Carga maxima [KN].	14,589	Desplazamiento total [mm].	5,081
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,062	Carga en el desplazamiento total [KN].	3,388

Anexo B.8

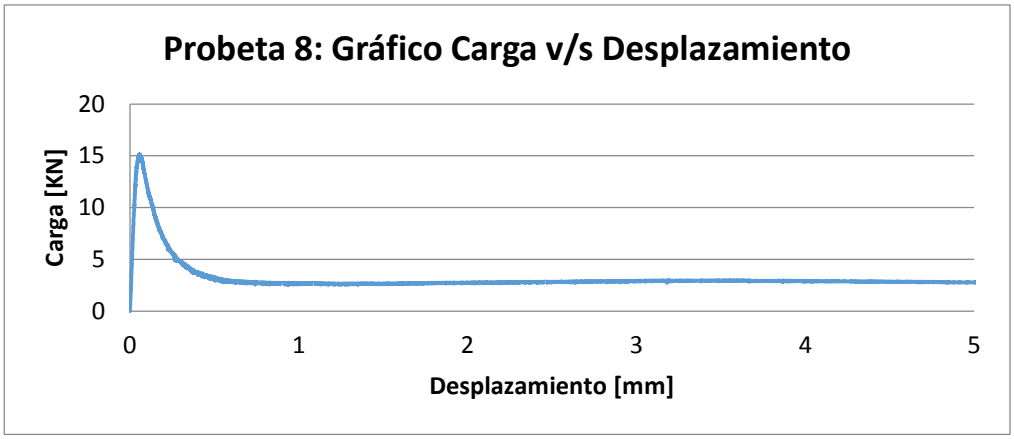
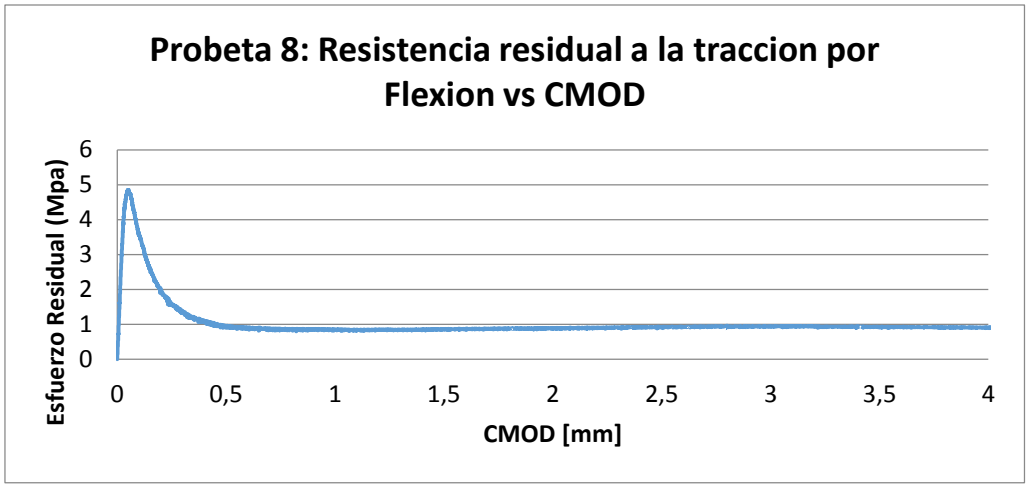


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	15,068	2,906	2,692	2,849	2,844

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	4,822	0,930	0,861	0,912	0,910

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,484	3,183	5,884	8,672	11,602

Carga maxima [KN].	15,145	Desplazamiento total [mm].	5,300
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,060	Carga en el desplazamiento total [KN].	2,751

Anexo B.9

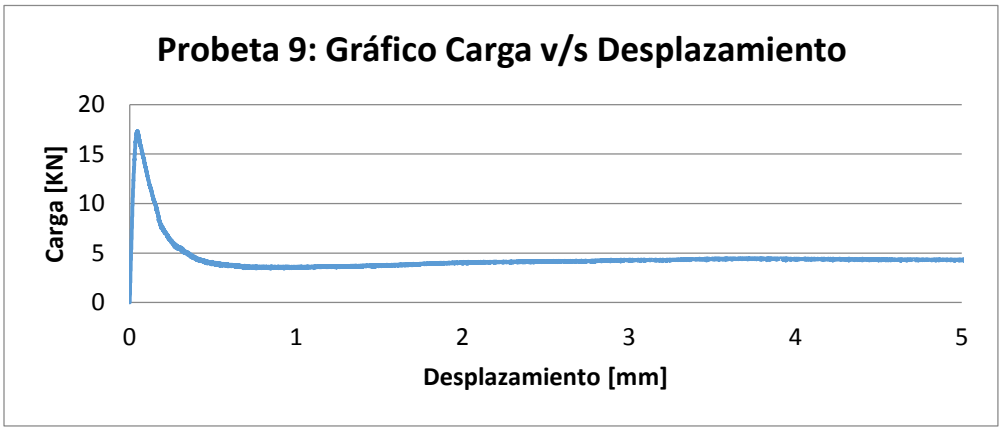
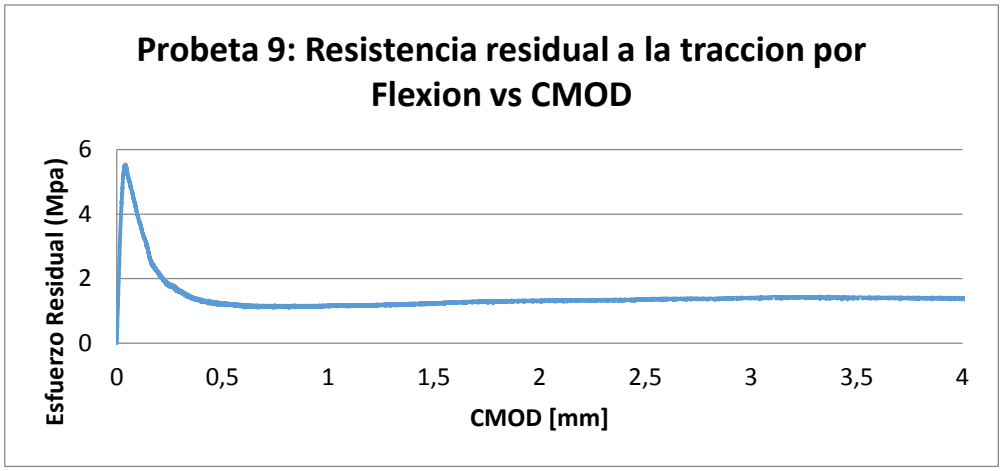


Grafico Carga v/s Desplazamiento



Resistencia residual a la tracción por Flexión vs CMOD

Resultados:

		Carga			
CMOD mm	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
KN	16,62	3,815	3,822	4,168	4,39

		RESISTENCIA RESIDUAL			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	5,318	1,221	1,223	1,334	1,405

		TENACIDAD			
CMOD mm.	0,05	0,5	1,5	2,5	3,5
Mpa	0,607	3,662	7,337	11,424	15,790

Carga maxima [KN].	17,298	Desplazamiento total [mm].	5,154
Desplazamiento en carga maxima [mm].	0,048	Carga en el desplazamiento total [KN].	4,288