

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis numérico del comportamiento en fractura de
hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados
con microfibras de carbono

Autor: María Benjumea Argudo

Tutor: Héctor Cifuentes Bulté

Dpto. Teoría de Estructuras y Medios Continuos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis numérico del comportamiento en fractura de hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con microfibras de carbono

Autor:

María Benjumea Argudo

Tutor:

Héctor Cifuentes Bulté

Catedrático de Universidad

Dpto. de Teoría de Estructuras y Medios Continuos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Análisis numérico del comportamiento en fractura de hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con microfibras de carbono

Autor: María Benjumea Argudo

Tutor: Héctor Cifuentes Bulté

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A todas las personas que me han acompañado durante esta etapa, especialmente a mi familia y a mis amigas que me han animado y apoyado hasta conseguir mi objetivo.

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio sobre el comportamiento del hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras de carbono. El objetivo principal es analizar las propiedades de este material, para ello se estudian hormigones reforzados con dos tipos de fibra diferentes y distintas cantidades de esta. Previo a este trabajo, se realizó un estudio experimental, que se toma como punto de partida. Se realizaron ensayos de flexión en tres puntos sobre tres probetas prismáticas entalladas con varios tipos de fibras diferentes y así poder estudiar las propiedades de fractura del hormigón reforzado. En este trabajo se obtiene una curva numérica Carga-CMOD para cada tipo de hormigón, además de la Ley Cohesiva para analizar como varían cada una de las propiedades del material. Para ello se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en ABAQUS. Los resultados que se obtienen son coherentes con lo obtenido experimentalmente, las fibras de carbono mejoran las propiedades del material. No obstante, se observan hallazgos inesperados para cantidades de fibra concretos que plantean la necesidad de repetir el ensayo experimental en algún caso.

Abstract

In this study, the behaviour of ultra-high performance concrete reinforced with carbon fibres is studied. The main objective is to analyse the properties of a reinforced concrete, for which two different types of fibre reinforced concrete are studied. Prior to this work, an experimental test was carried out, which is taken as the starting point of this work. Three-point bending tests were carried out on three prismatic specimens notched with several different types of fibres in order to study the fracture properties of the reinforced concrete. The aim of this work is to obtain a numerical Load-CMOD curve for each type of concrete, as well as the Cohesive Law to analyse how each of the properties of the material vary. For this purpose, a finite element model has been designed in ABAQUS. The results obtained are consistent with what was expected, carbon fibres improve the material properties. However, unexpected findings are observed for specific fibre quantities that suggest the need to repeat the experimental test in some cases.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
Índice de Gráficas	xvii
Notación	xix
1 Introducción	1
1.1 Contexto e importancia del estudio	1
1.2 Objetivo y metodología del estudio	2
2 Antecedentes	3
2.1 Hormigón reforzado con fibras de carbono	3
2.2 Estudio experimental previo y datos de referencia	4
2.2.1 Procedimiento y resultados de propiedades mecánicas y de fractura	4
3 Modelo de elementos finitos	7
3.1 Modelo de elementos cohesivos	7
3.1.1 Geometría	8
3.1.2 Definición del material	9
3.1.3 Condiciones de contorno y carga	9
3.1.4 Malla	10
3.2 Desarrollo del modelo	11
3.2.1 Curvas Carga - CMOD Hormigón de referencia	12
3.2.2 Curvas Carga - CMOD Hormigón con fibras	13
4 Resultados	25
4.1 Parámetros de ajuste de curva Carga - CMOD	25
4.1.1 Hormigón reforzado con Fibra B	26
4.1.2 Hormigón reforzado con Fibra C	28
4.2 Ley cohesiva	30
4.2.1 Hormigón de Referencia	32
4.2.2 Hormigón reforzado con Fibra B	33
4.2.3 Hormigón reforzado con Fibra C	36
5 Discusión de los resultados	39
5.1 Resistencia a tracción	39
5.2 Módulo de deformación longitudinal	40
5.3 Apertura máxima de grieta	41
5.4 Energía de Fractura	41
5.5 Microfisuración del hormigón	42
6 Conclusiones y desarrollos futuros	43
6.1 Conclusiones	43
6.2 Nuevas líneas de investigación	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de las microfibras de carbono.	4
Tabla 2: Resolución de las propiedades del hormigón reforzado con la Fibra B.	26
Tabla 3: Valores para las propiedades del hormigón reforzado con la Fibra C.	28
Tabla 4: Parámetros Ley tracción – separación para Hormigón de referencia.	32
Tabla 5: Parámetros Ley tracción – separación para Hormigón con Fibra B.	35
Tabla 6: Parámetros Ley tracción – separación para Hormigón con Fibra C.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Observación visual e imágenes de microscopio electrónico de las fibras de carbono utilizadas en el estudio experimental [3].	4
Figura 2: Probeta prismática– Ensayo en tres puntos.	5
Figura 3: Probeta prismática - Estudio experimental	5
Figura 4: Resultados del módulo de Young para cada mezcla y contenido de fibra de carbono [3].	6
Figura 5: Resultados de la resistencia a tracción para cada mezcla y contenido de fibra de carbono [3].	6
Figura 6: Evolución exponencial del daño en un elemento Cohesivo.	8
Figura 7: Representación de la geometría de la entalla implementada en ABAQUS	8
Figura 8: Representación y diferenciación por colores de la zona de hormigón cohesivo y elástico.	9
Figura 9: Representación de las condiciones de apoyo y desplazamiento vertical en el modelo.	10
Figura 10: Representación del mallado implementado en el modelo numérico en ABAQUS.	10
Figura 11: Ley exponencial de tracción – separación.	30
Figura 12: Ley bilineal de tracción - separación	30
Figura 13: Representación de la Ley de tracción – separación. Exponencial y Bilineal superpuestas para el Hormigón de Referencia.	31

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Curvas Experimentales del Hormigón de Referencia	12
Gráfica 2: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón de Referencia	12
Gráfica 3: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m ³ de Fibra B.	13
Gráfica 4: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m ³ de Fibra B.	13
Gráfica 5: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 3 kg/m ³ de Fibra B.	14
Gráfica 6: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 3 kg/m ³ de Fibra B.	14
Gráfica 7: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 6 kg/m ³ de Fibra B.	15
Gráfica 8: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 6 kg/m ³ de Fibra B.	15
Gráfica 9: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 9 kg/m ³ de Fibra B.	16
Gráfica 10: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 9 kg/m ³ de Fibra B.	16
Gráfica 11: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 15 kg/m ³ de Fibra B.	17
Gráfica 12: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 15 kg/m ³ de Fibra B.	17
Gráfica 13: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 20 kg/m ³ de Fibra B.	18
Gráfica 14: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 20 kg/m ³ de Fibra B.	18
Gráfica 15: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m ³ de Fibra C.	19
Gráfica 16: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m ³ de Fibra C.	19
Gráfica 17: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 3 kg/m ³ de Fibra C.	20
Gráfica 18: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 3 kg/m ³ de Fibra C.	20
Gráfica 19: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 6 kg/m ³ de Fibra C.	21
Gráfica 20: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 6 kg/m ³ de Fibra C.	21
Gráfica 21: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 9 kg/m ³ de Fibra C.	22
Gráfica 22: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 9 kg/m ³ de Fibra C.	22
Gráfica 23: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 15 kg/m ³ de Fibra C.	23
Gráfica 24: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 15 kg/m ³ de Fibra C.	23
Gráfica 25: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 20 kg/m ³ de Fibra C.	24
Gráfica 26: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 20 kg/m ³ de Fibra C.	24
Gráfica 27: Representación Resistencia a tracción – Cantidad de fibra. Fibra B.	26
Gráfica 28: Desplazamiento máximo – Cantidad de fibra. Fibra B.	27
Gráfica 29: Módulo Elasticidad - Cantidad de fibra. Fibra B.	27
Gráfica 30: Resistencia a tracción – Cantidad de fibra. Fibra C.	28
Gráfica 31: Desplazamiento máximo – Cantidad de fibra. Fibra C.	28
Gráfica 32: Módulo Elasticidad - Cantidad de fibra. Fibra C.	29
Gráfica 33: Ley de tracción - separación de Hormigón de Referencia. (a) Exponencial (b) Bilineal	32

Gráfica 34: Ley de tracción - separación Hormigón con 1,2 kg/m ³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal	33
Gráfica 35: Ley de tracción - separación Hormigón con 3 kg/m ³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal	33
Gráfica 36: Ley de tracción - separación Hormigón con 6 kg/m ³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal	33
Gráfica 37: Ley de tracción - separación Hormigón con 9 kg/m ³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal	34
Gráfica 38: Ley de tracción - separación Hormigón con 15 kg/m ³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal	34
Gráfica 39: Ley de tracción - separación Hormigón con 20 kg/m ³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal	34
Gráfica 40: Apertura máxima de grieta – Cantidad de fibra. Fibra B	35
Gráfica 41: Energía de Fractura – Cantidad de fibra. Fibra B.	35
Gráfica 42: Ley de tracción - separación Hormigón con 1,2 kg/m ³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal	36
Gráfica 43: Ley de tracción - separación Hormigón con 3 kg/m ³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal	36
Gráfica 44: Ley de tracción - separación Hormigón con 6 kg/m ³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal	36
Gráfica 45: Ley de tracción - separación Hormigón con 9 kg/m ³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal	37
Gráfica 46: Ley de tracción - separación Hormigón con 15 kg/m ³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal	37
Gráfica 47: Ley de tracción - separación Hormigón con 20 kg/m ³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal	37
Gráfica 48: Apertura máxima de grieta – Cantidad de fibra. Fibra C.	38
Gráfica 49: Resistencia a tracción Energía de Fractura – Cantidad de fibra. Fibra B.	38
Gráfica 50: Comparativa Resistencia a tracción – Cantidad de Fibra.	39
Gráfica 51: Comparativa Módulo de Elasticidad – Cantidad de Fibra.	40
Gráfica 52: Comparativa Apertura máxima de grieta – Cantidad de Fibra.	41
Gráfica 53: Comparativa Energía de Fractura – Cantidad de Fibra.	41
Gráfica 54: Comparativa pendiente a_1 – Cantidad de Fibra.	42

CMOD	Apertura de la grieta
FRC-B	Hormigón reforzado con fibras Tipo B
FRC-C	Hormigón reforzado con fibras Tipo C

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto e importancia del estudio

En el campo de la construcción, el hormigón desempeña un papel fundamental ya que es un material muy versátil, con buenas propiedades de durabilidad y resistencia a compresión que hacen que sea uno de los materiales más utilizados. Sin embargo, debido a la reducida resistencia a tracción de este material, los fallos de los elementos estructurales de hormigón suceden normalmente debido a esfuerzos de tracción, originados directa o indirectamente. [1]

Es fundamental una investigación continua en la búsqueda de nuevas formas y técnicas para mejorar el comportamiento del hormigón, para así optimizar las propiedades del material y superar sus limitaciones inherentes. Se busca fortalecer el hormigón contra los esfuerzos de tracción, ya que así se reducen significativamente las posibilidades de fallos estructurales, lo que se traduce en una mayor seguridad y durabilidad de las construcciones. Además, mejorar el comportamiento del hormigón puede permitir la construcción de estructuras más livianas, sin comprometer su resistencia. Esto resulta un uso más eficiente de los materiales y una reducción en los costos de construcción.

Para mejorar notablemente las propiedades del material, una de las líneas de investigación y la que se va a desarrollar en este trabajo es la adición de fibras a la mezcla de hormigón. El reforzamiento del hormigón mediante fibras es una técnica en la que se incorporan fibras de pequeñas dimensiones al hormigón para coser las micro fisuras que se forman en el material. Por lo general, estas fibras son de naturaleza metálica, y se distribuyen de manera homogénea en toda la matriz de hormigón y mejoran las propiedades de este [1].

Los hormigones reforzados con fibras de ultra-altas prestaciones alcanzan resistencias a compresión superiores a 200 MPa y a flexión superiores a 30 MPa [2], es un material donde la proporción de agua en relación al aglomerante es típicamente inferior a 0,2, están fabricados por áridos con granulometría fina que permiten que mejore el proceso de hidratación y así conseguir una estructura del material con baja porosidad, por lo tanto, mucho más densa, que favorece la desaparición de imperfecciones en el futuro. La adición de fibras consigue mejorar la ductilidad del material, ya que estas fibras se oponen la propagación de grietas, actuando como fuerza de unión entre las superficies agrietadas [3].

Este trabajo se centra en el análisis de hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras de carbono.

1.2 Objetivo y metodología del estudio

En este estudio se analizan las propiedades de un hormigón reforzado con fibras de carbono de ultra-altas prestaciones fabricado con distintos tipos y cantidades de estas.

Se ha realizado un estudio experimental previo donde se muestra la influencia de la cantidad y tipo de fibra añadida en la matriz sobre la estructura interna del material (tamaño y distribución de poros) y, en consecuencia, sobre sus propiedades de fractura [3] que será el punto de partida y de referencia de este trabajo. Se analiza cómo las fibras modifican el comportamiento del hormigón, que propiedades de este se ven beneficiadas y cuales no en función del tipo y cantidad de fibra añadida. Para ello se obtiene una curva numérica Carga-CMOD para cada tipo y cantidad de fibra utilizada, y se representa así mismo la Ley Cohesiva, Ley de tracción – separación, de cada mezcla y así analizar como varían sus propiedades de fractura.

Para ello, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en ABAQUS. En este modelo se incorporan elementos cohesivos para poder realizar un análisis detallado del comportamiento del material. Mediante un análisis inverso se obtienen las curvas numéricas Carga-CMOD a partir de los resultados obtenidos en el estudio experimental.

2 ANTECEDENTES

En este capítulo se exponen las características del hormigón de ultra-alta resistencia reforzado con fibras de alto rendimiento, y concretamente el hormigón reforzado con fibras de carbono. Se explican las características de este tipo de fibras, su comportamiento mecánico, así como sus aplicaciones y ventajas.

2.1 Hormigón reforzado con fibras de carbono

El hormigón reforzado con fibras es un material en el que las fibras mejoran las propiedades de la mezcla, en especial la tracción y la fractura [4]. Con la adición de fibras se sigue el mismo planteamiento que al introducir en el hormigón barras de acero, armaduras, que soportan las tracciones del elemento estructural [1].

Las fibras que se introducen en el hormigón pueden ser de diferentes materiales [1]. Entre todos los tipos de fibras, las de acero son las más utilizadas ya que tienen una resistencia alta. Entre las principales desventajas de este tipo de fibra, destaca la corrosión interna y el agrietamiento del material debido a la expansión térmica que hacen que se reduzca la adherencia entre el acero y el hormigón [3].

En este trabajo se investiga el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de carbono, ya que estas últimas ofrecen mejoras significativas en comparación con las fibras de acero. La incorporación de fibras de carbono resuelve problemas como la corrosión interna, ya que tiene mayor estabilidad a la temperatura y a la corrosión, además de tener muy buenas propiedades mecánicas. Estas fibras, al ser menos densas, permiten la construcción de estructuras de hormigón más livianas y económicas, dado que se requiere una menor cantidad de fibras en comparación con los refuerzos de acero [3].

Estas fibras de carbono tienen un carácter novedoso ya que se tienen datos limitados debido a su reciente introducción en la investigación de hormigones reforzados. Las fibras utilizadas en este estudio, como se verá a continuación (Tabla 1) tienen un grosor de tan solo 7 μm , lo que permite lograr un refuerzo a una escala microscópica. Debido a su tamaño extremadamente pequeño, estas fibras pueden integrarse más eficazmente en la estructura del material, lo que a su vez aumenta la capacidad general del material para soportar fuerzas y cargas en escalas menores que las obtenidas mediante el uso de fibras de acero, que poseen diámetros en el rango de décimas de milímetros.

2.2 Estudio experimental previo y datos de referencia

2.2.1 Procedimiento y resultados de propiedades mecánicas y de fractura

En el estudio experimental previo a este trabajo, se llevó a cabo un análisis experimental multiescala para estudiar cómo las distintas fibras de carbono influyen en el refuerzo del hormigón de ultra-altas prestaciones. Se estudió el hormigón reforzado con diversas variedades de fibras de carbono, variando en longitud y resistencia a la tracción, con el fin de evaluar sus características mecánicas y de fractura, para así establecer relaciones entre los resultados obtenidos, las fibras utilizadas y la estructura porosa de la matriz del hormigón [3].

Se utilizaron cinco tipos de fibras de carbono con distintas geometrías y propiedades que se detallan en la Tabla 1: Propiedades de las microfibras de carbono. Se analizaron seis contenidos de fibra para cada mezcla fabricada 1, 2, 3, 6, 9, 15 y 20 kg/m³. En este trabajo se estudian las fibras tipo B y C.

TIPO DE FIBRA	LONGITUD, L (MM)	DIÁMETRO, ϕ (μ M)	RESISTENCIA A TRACCIÓN, F_T (MPa)	MÓDULO DE YOUNG, E (GPa)	(L/ ϕ)
CF-A	0.05-0.3	7	4200	230	7-43
CF-B	3	7	4200	230	429
CF-C	6	7	4200	230	857
CF-D	6	7	9000	220	857
CF-E	3	7	3000	220	429

Tabla 1: Propiedades de las microfibras de carbono [3].

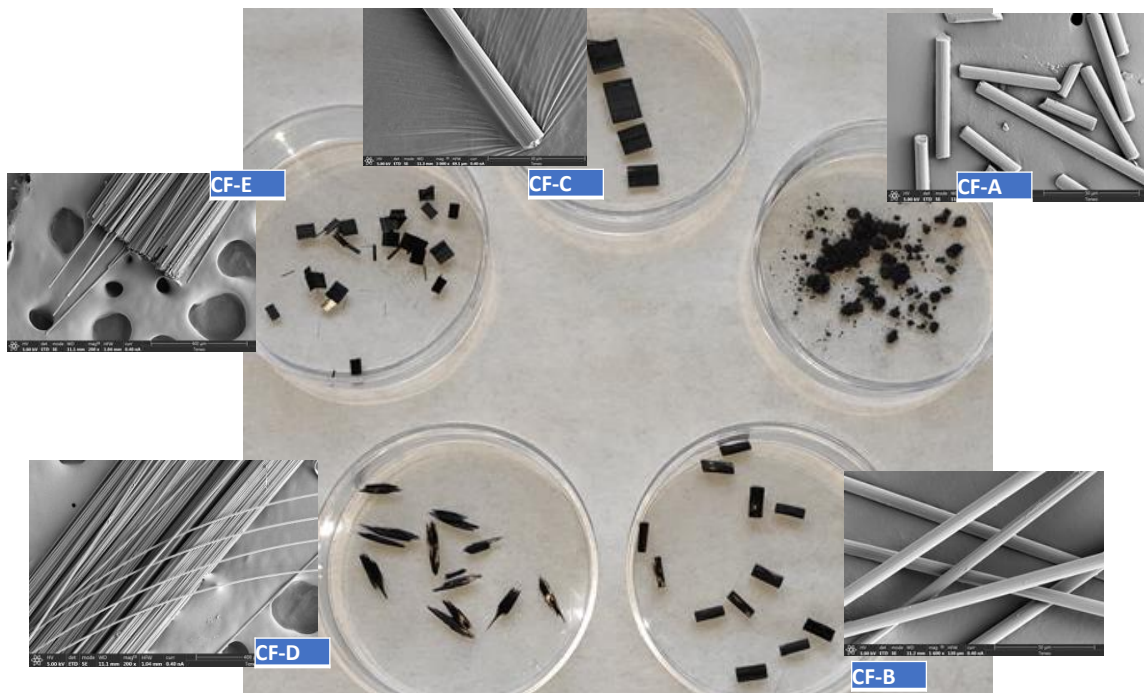


Figura 1: Observación visual e imágenes de microscopio electrónico de las fibras de carbono utilizadas en el estudio experimental [3].

Se realizaron ensayos de flexión en tres puntos sobre tres probetas prismáticas de 40x40x160 mm³ entalladas donde la relación muesca-profundidad era una sexta parte (Figura 2).

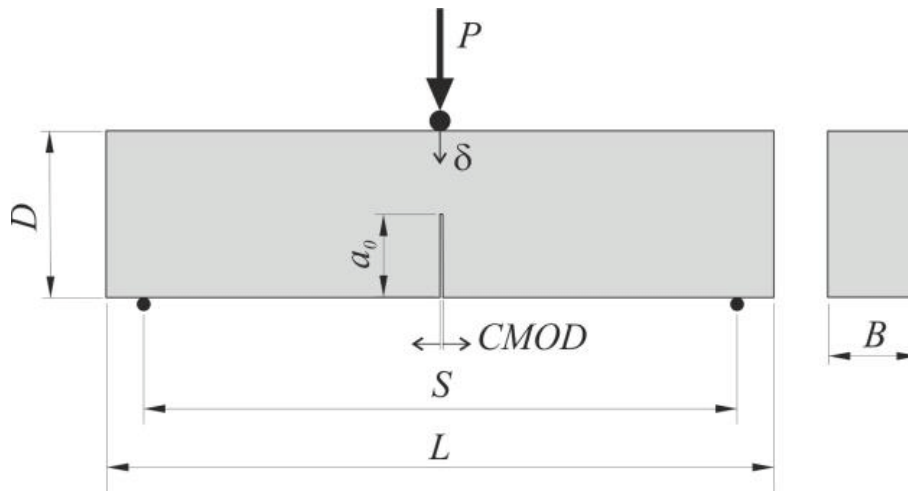


Figura 2: Probeta prismática– Ensayo en tres puntos.

Donde,

$D = 40 \text{ mm.}$

$S = 100 \text{ mm.}$

$L = 160 \text{ mm.}$

$B = 40 \text{ mm.}$

$a_0 = 1/6 D.$

$S = 3 \text{ mm.}$



Figura 3: Probeta prismática - Estudio experimental

Se determinó el módulo de Young a partir de las curvas experimentales carga-CMOD y la resistencia a tracción a partir de las leyes de cohesión bilineales [3]. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo experimental en función del tipo y cantidad de fibra.

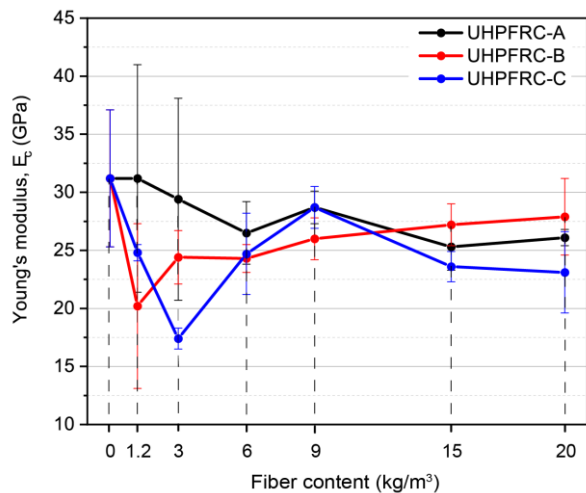


Figura 4: Resultados del módulo de Young para cada mezcla y contenido de fibra de carbono [3].

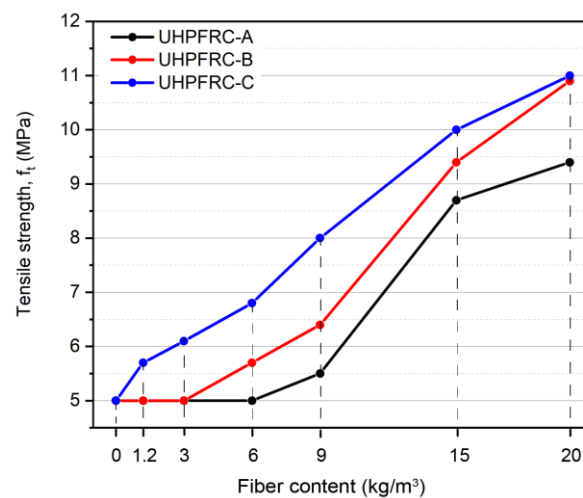


Figura 5: Resultados de la resistencia a tracción para cada mezcla y contenido de fibra de carbono [3].

3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

En el presente capítulo, se presenta detalladamente el modelo de elementos finitos que ha sido desarrollado en ABAQUS como parte de este trabajo de investigación. El enfoque principal de este modelo radica en su representación fiel de la probeta utilizada durante el ensayo experimental, incorporando todas sus características relevantes. La aplicación del método de elementos finitos se ha hecho con el propósito de hacer un análisis de las propiedades mecánicas y de fractura del hormigón reforzado, se pretende alcanzar una comprensión de la influencia que ejercen las distintas fibras en la matriz del hormigón. En las siguientes secciones, se expondrán los detalles del modelo.

3.1 Modelo de elementos cohesivos

Los modelos numéricos que utilizan la mecánica de la fractura del hormigón se encargan de simular el comportamiento asociado a las tensiones de debilitamiento en tracción. A través de estos modelos, se pueden llevar a cabo diversos estudios numéricos que permiten analizar el nivel de seguridad tras la aparición de una grieta y realizar el análisis de propagación hasta el fallo del elemento [1].

En el modelo de elementos finitos que se ha realizado en este trabajo, el uso de elementos cohesivos ha sido esencial para obtener de la manera aceptable el comportamiento de las superficies de fractura y las zonas de daño en el hormigón. Los elementos cohesivos son componentes especiales disponibles en ABAQUS [5], destacan por su capacidad para permitir grandes deformaciones en el modelo [1].

Los elementos cohesivos son herramientas utilizadas para simular el comportamiento de uniones y discontinuidades en materiales, son útiles para modelar el desprendimiento y la separación de superficies en estructuras. Se caracterizan por su capacidad para simular el comportamiento de la interfaz entre dos regiones en un modelo de elementos finitos, donde en lugar de modelar la interfaz como una unión rígida, los elementos cohesivos permiten representar la respuesta mecánica de la separación y el deslizamiento entre las superficies [5]. Es por eso por lo que, a la hora de definir el material de la probeta entallada, se define la zona ubicada en la parte superior a la entalla con elementos cohesivos (Zona Cian. Figura 8), que es donde se espera que se produzca la grieta del hormigón.

Los elementos cohesivos pueden ser utilizados para la simulación del daño en la zona de ligamento del material en una probeta de hormigón, se puede elegir una ley de ablandamiento lineal o exponencial (Figura 6) que define la evolución detallada (entre la iniciación y el fallo completo) de la variable de daño, como una función del desplazamiento efectivo más allá de la iniciación del daño [5].

Para el ablandamiento exponencial, Abaqus utiliza una evolución de la variable daño que se reduce a;

$$D = 1 - \left\{ \frac{\delta_m^o}{\delta_m^{max}} \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp(-\alpha(\frac{\delta_m^{max} - \delta_m^o}{\delta_m^f - \delta_m^o}))}{1 - \exp(-\alpha)} \right\}$$

Donde α es un parámetro adimensional que define la tasa de evolución del daño y es la función exponencial. Este valor será de vital importancia en el modelo y se modificará de tal manera que la curva comportamiento de la evolución del daño numérica se parezca lo máximo posible a la experimental.

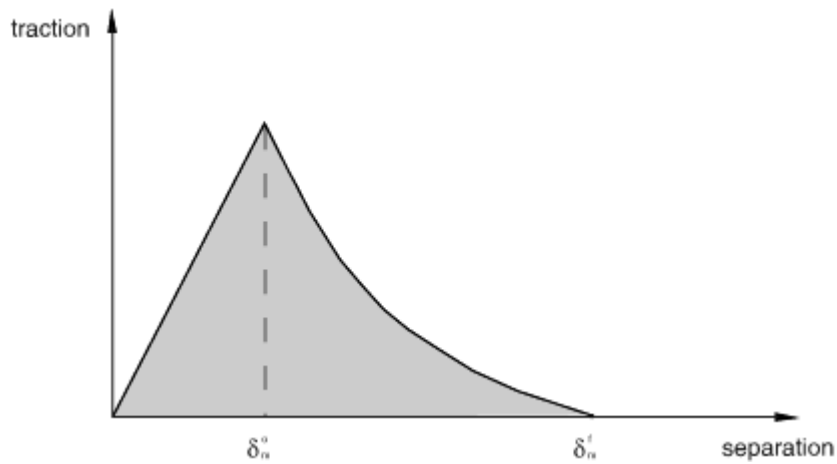


Figura 6: Evolución exponencial del daño en un elemento Cohesivo.

3.1.1 Geometría

Se ha representado la geometría de la probeta entallada manteniendo las mismas dimensiones que se utilizaron en el ensayo experimental (Figura 2). La probeta tiene una forma prismática con medidas de 40x40x160 mm³. Se ha respetado la relación de profundidad de la entalla, que equivale a un sexto del largo total de la probeta, lo que significa que la entalla tiene una longitud de 26.67 mm. Además, se ha respetado la distancia específica entre los apoyos que sujetan la probeta en el modelo de elementos finitos, lo que permite simular las condiciones de carga y apoyo del ensayo experimental.

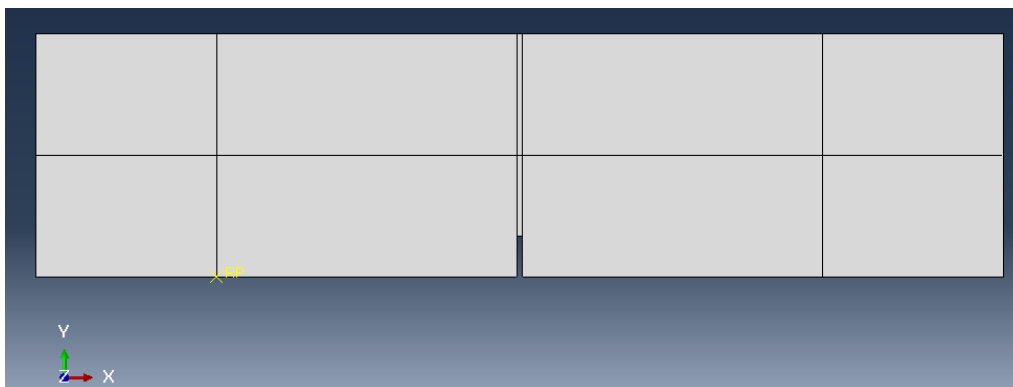


Figura 7: Representación de la geometría de la entalla implementada en ABAQUS

3.1.2 Definición del material

En el modelo de elementos finitos implementado en ABAQUS, se ha considerado la presencia de dos tipos distintos de hormigón: el cohesivo y el elástico. Estos dos materiales se han dispuesto de manera específica para simular adecuadamente el comportamiento de la probeta entallada.

El hormigón cohesivo, que representa la zona crítica donde se producirá el fallo del material, ha sido ubicado en la parte superior de la entalla (Zona Cian. Figura 8). Esta disposición se justifica debido a que, en condiciones de carga y fractura para un ensayo a flexión en tres puntos sobre probetas entalladas, es en esta zona donde se espera que el hormigón falle y se produzca la propagación de la grieta. Por otro lado, el hormigón elástico se ha colocado en otras regiones de la entalla (Zona Ámbar. Figura 8). Este tipo de hormigón es utilizado para modelar la respuesta elástica del material antes de alcanzar el punto de fallo, permitiendo analizar cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones en la probeta antes de la fractura.

Esta distinción de los dos tipos de hormigón en la entalla del modelo de elementos finitos proporciona una representación más realista y detallada del comportamiento de la probeta entallada y permite estudiar el proceso de fractura con mayor precisión.

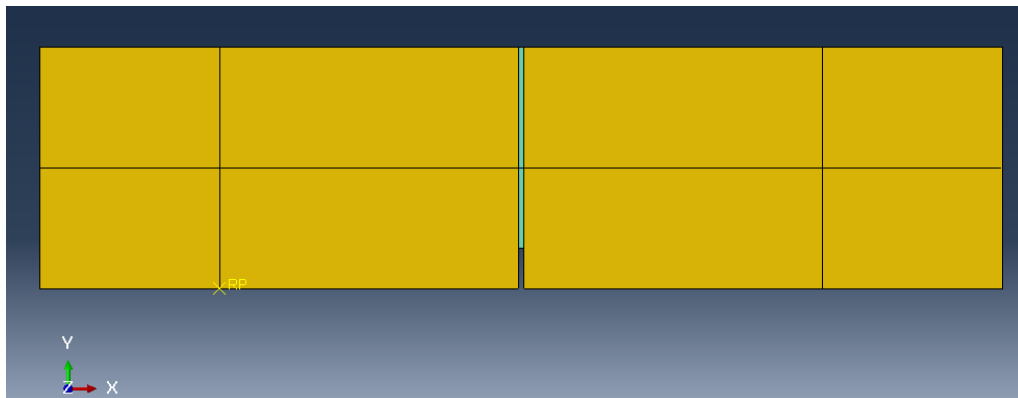


Figura 8: Representación y diferenciación por colores de la zona de hormigón cohesivo y elástico.

3.1.3 Condiciones de contorno y carga

En relación con las condiciones de contorno, se han aplicado restricciones a los apoyos de acuerdo con la distancia especificada en el ensayo experimental, 100 mm. Uno de los apoyos es fijo, con una restricción que garantiza una fijación completa en ambas direcciones. En cuanto al otro apoyo, se trata de un apoyo deslizante, donde se ha impedido únicamente la traslación horizontal, permitiendo que el apoyo pueda desplazarse verticalmente para permitir cierta deformación vertical de la probeta.

En lo que respecta a la carga, se ha aplicado un desplazamiento vertical en dirección gravitatoria en el centro de la probeta. Esta carga representa una fuerza aplicada en esa ubicación específica, ejerciendo una deformación hacia abajo en la probeta. El desplazamiento vertical se utiliza para simular las condiciones reales de carga en la probeta entallada durante el ensayo experimental. Al aplicar esta carga en el centro de la probeta, se reproduce la configuración del ensayo y se estudia cómo reacciona el material frente a dicha carga.

Mediante el análisis de este desplazamiento vertical en el centro de la probeta, el modelo de elementos finitos permitirá evaluar cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones en la estructura durante la fractura y cómo se propaga la grieta a medida que aumenta la carga aplicada.

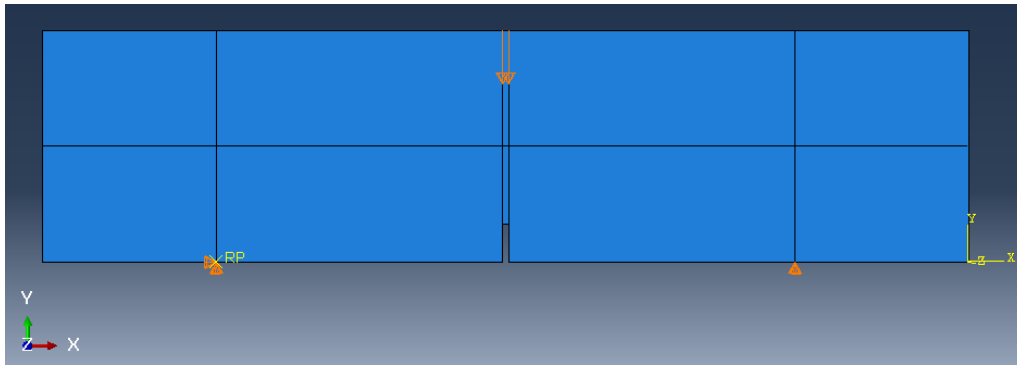


Figura 9: Representación de las condiciones de apoyo y desplazamiento vertical en el modelo.

3.1.4 Malla

La elección de la malla se realizó teniendo en cuenta una simetría en la región de fractura de la probeta, lo que permite una representación adecuada de la simetría estructural en el modelo.

En los elementos cohesivos, a diferencia de otros, las mallas de los elementos a unir no tienen que presentar necesariamente una coincidencia nodal, por lo que no es necesario el refinado de la malla en la zona de separación del hormigón [1].

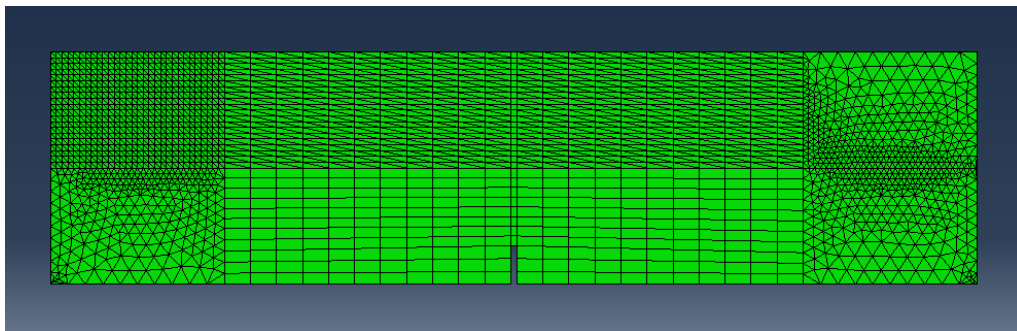


Figura 10: Representación del mallado implementado en el modelo numérico en ABAQUS.

3.2 Desarrollo del modelo

Una vez establecidas todas las características del modelo numérico, el procedimiento se lleva a cabo a través de un proceso iterativo y análisis inverso. El objetivo principal de este enfoque es lograr una concordancia óptima entre la curva carga-CMOD obtenida del ensayo experimental y la curva numérica generada mediante el modelo en ABAQUS. Durante este proceso iterativo, se ajustan diferentes variables y parámetros del modelo, hasta que las curvas carga-CMOD numérica y experimental muestran una similitud significativa. Esto implicó realizar múltiples simulaciones, ajustar las condiciones de carga, las propiedades de los materiales y las características de los elementos cohesivos para lograr una mejor correspondencia con los resultados experimentales.

Se tienen tres curvas experimentales, ya que el ensayo experimental se repitió en tres ocasiones para cada tipo y cantidad de fibra, por lo que, para poder ajustar la curva numérica, se halla en primer lugar la curva media de las experimentales, para así a partir de ella ajustar las curvas numéricas tomando esa curva media como referencia.

El proceso iterativo inverso es una estrategia comúnmente empleada para validar y calibrar modelos numéricos en función de datos experimentales conocidos. Al obtener una concordancia cercana entre la curva de carga-CMOD del ensayo y la curva numérica, se aumenta la confianza en la capacidad del modelo para predecir el comportamiento en fractura y el desempeño del material en condiciones similares a las del ensayo real.

Este proceso de validación iterativa es fundamental para garantizar que el modelo numérico sea una herramienta precisa y confiable para el análisis y el diseño de estructuras sujetas a cargas y fractura, y para proporcionar una comprensión más profunda de los fenómenos involucrados en el comportamiento del material bajo condiciones críticas de carga.

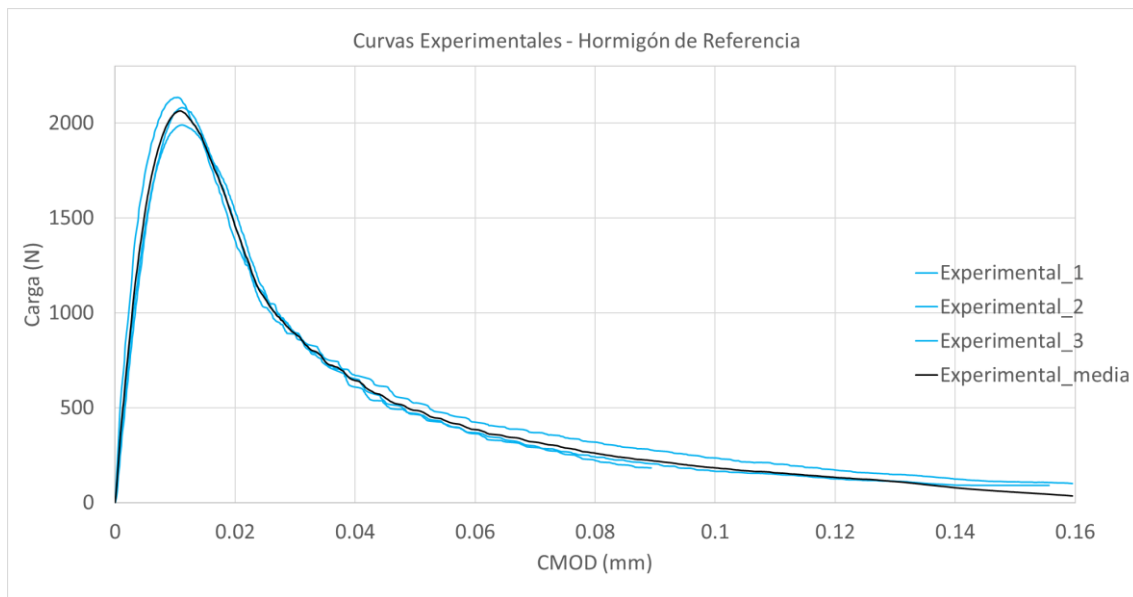
El modelo numérico ha sido desarrollado para representar el comportamiento del hormigón reforzado con las fibras de carbono tipo C y tipo B, cuyas características se presentaron anteriormente (Tabla 1). El estudio de dos tipos de fibras permite evaluar cómo cada una de ellas influye en las propiedades mecánicas y de fractura del hormigón reforzado. Al simular el comportamiento del hormigón con ambos tipos de fibras, se podrán analizar sus respectivas contribuciones a la resistencia y durabilidad del material compuesto, lo que proporcionará una visión más completa y precisa del rendimiento general del hormigón de ultra altas prestaciones reforzado con fibras de carbono. Permitirá realizar comparaciones significativas y extraer conclusiones más fundamentadas. Esto, a su vez, contribuirá al avance del conocimiento en el campo de este tipo de materiales y a la optimización del diseño y rendimiento de estructuras de hormigón reforzado en aplicaciones prácticas.

3.2.1 Curvas Carga - CMOD Hormigón de referencia

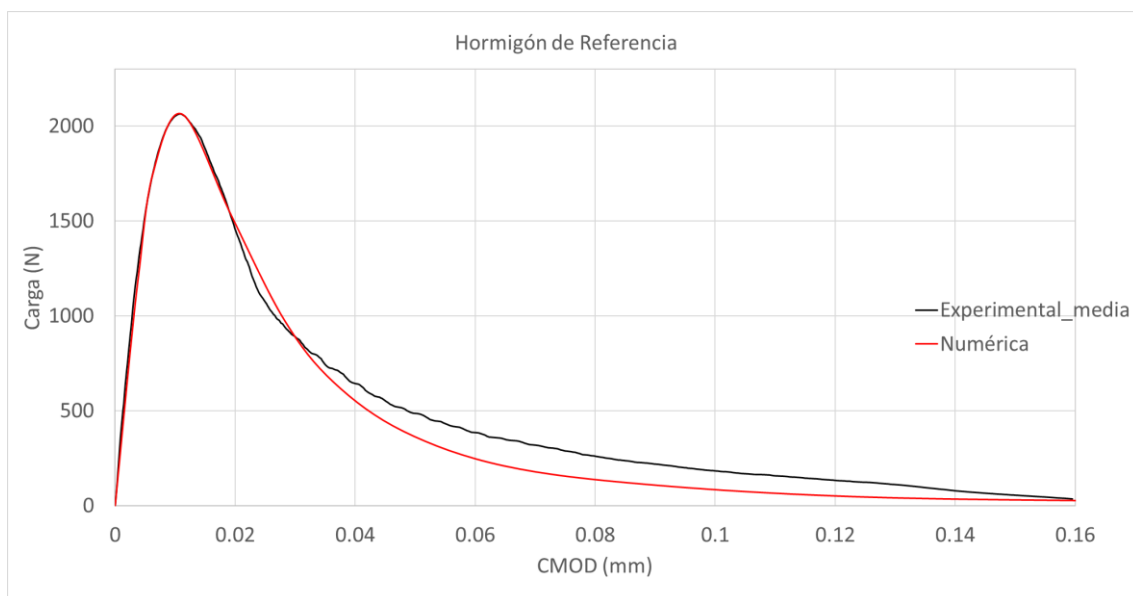
Con el objetivo de analizar cómo afectan las fibras al hormigón, se ha estudiado en primer lugar un hormigón sin fibras, “hormigón de referencia”, como base para el análisis. Esto es fundamental para establecer un punto de referencia definido desde el cual se puedan apreciar los efectos y cambios producidos por la adición de fibras al hormigón.

La comparación se enfocará en parámetros tales como la resistencia a tracción, módulo de elasticidad y apertura de la grieta máxima permitida. Estos datos permitirán discutir cómo la inclusión de fibras altera y mejora las prestaciones del hormigón.

Siguiendo con el procedimiento explicado anteriormente, se han ajustado las propiedades del hormigón de referencia haciendo semejantes la curva experimental del ensayo con la curva numérica obtenida mediante el modelo en ABAQUS.



Gráfica 1: Curvas Experimentales del Hormigón de Referencia

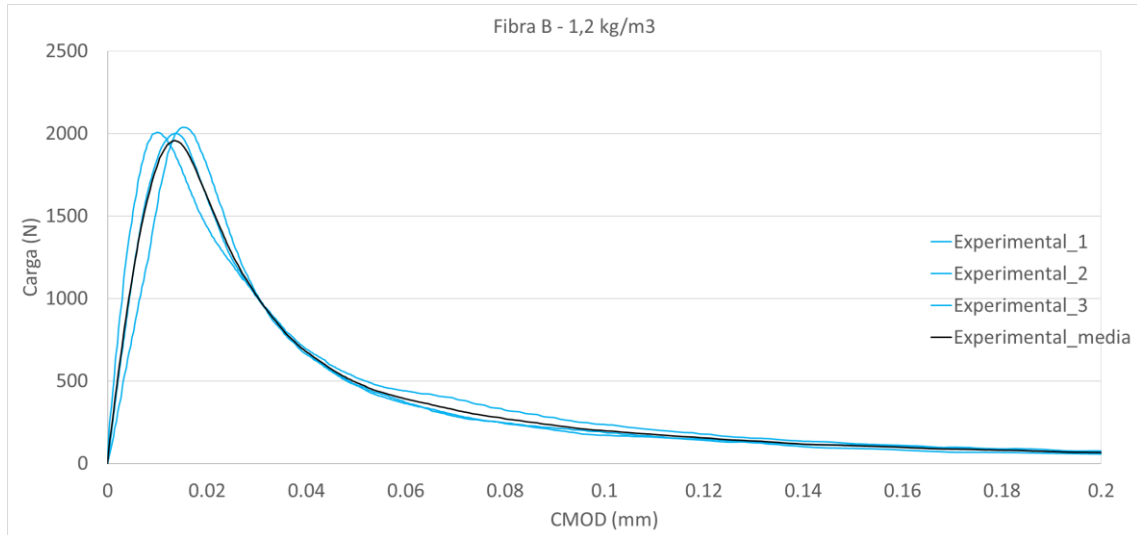


Gráfica 2: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón de Referencia

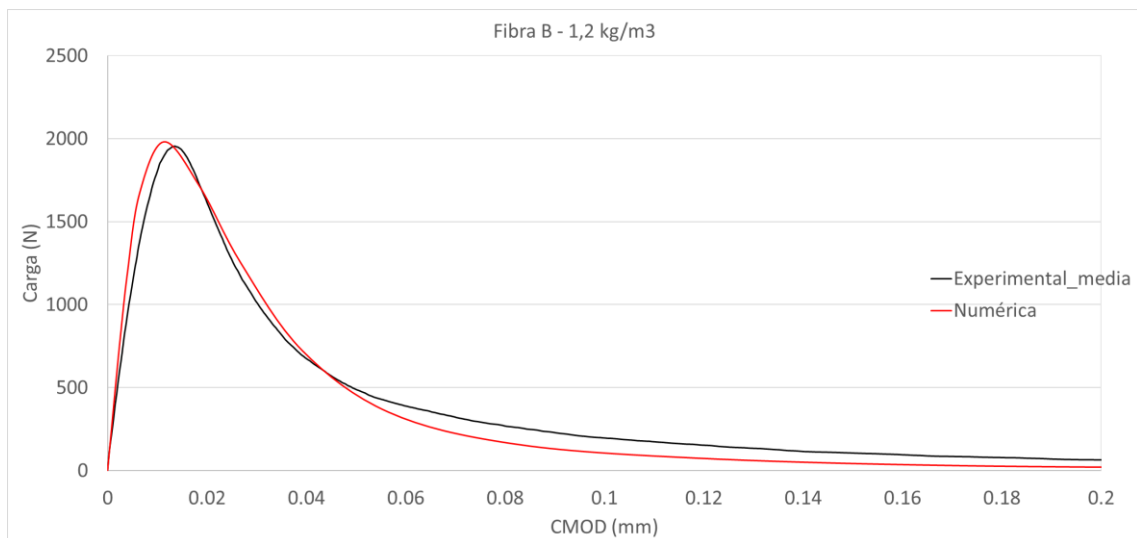
3.2.2 Curvas Carga - CMOD Hormigón con fibras

A continuación, siguiendo con el mismo procedimiento, se muestran todas las curvas Carga-CMOD que se han obtenido para cada tipo y cantidad de fibra.

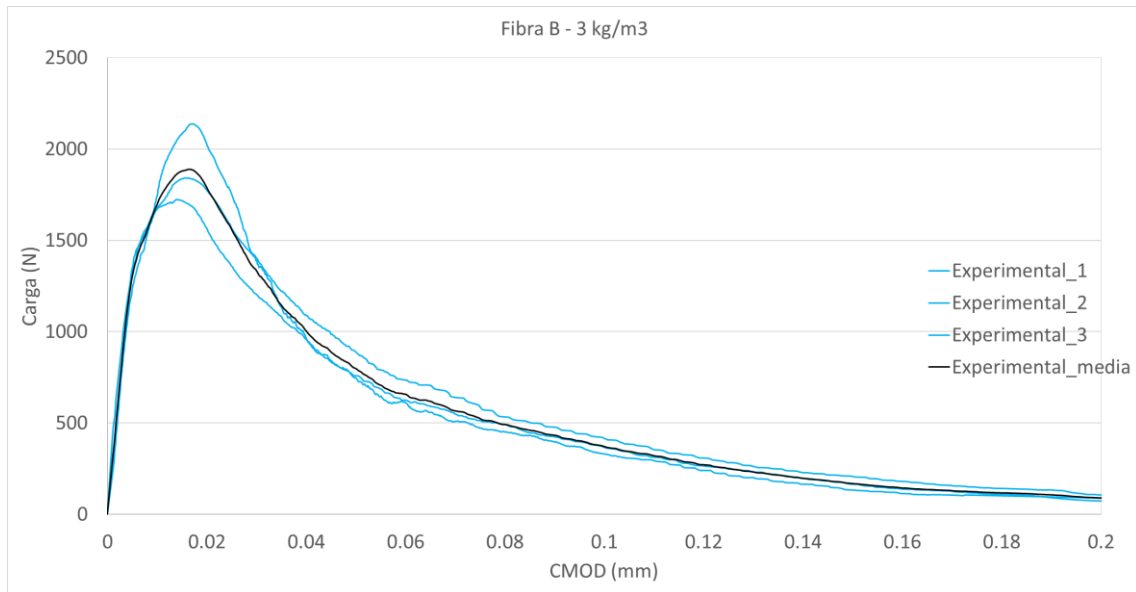
3.2.2.1 Hormigón reforzado con Fibra B



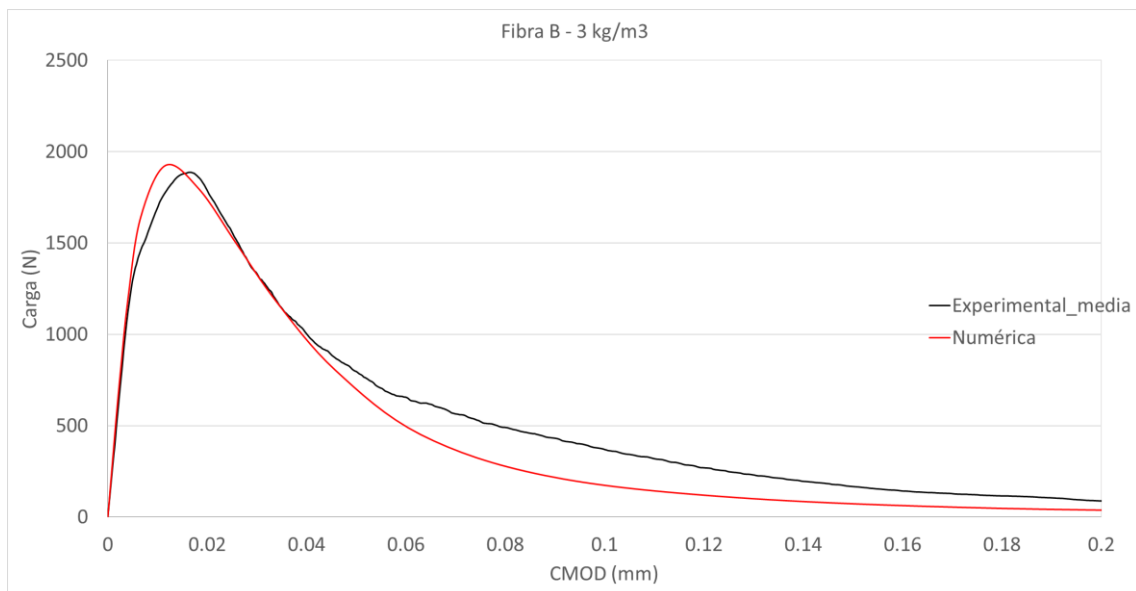
Gráfica 3: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m³ de Fibra B.



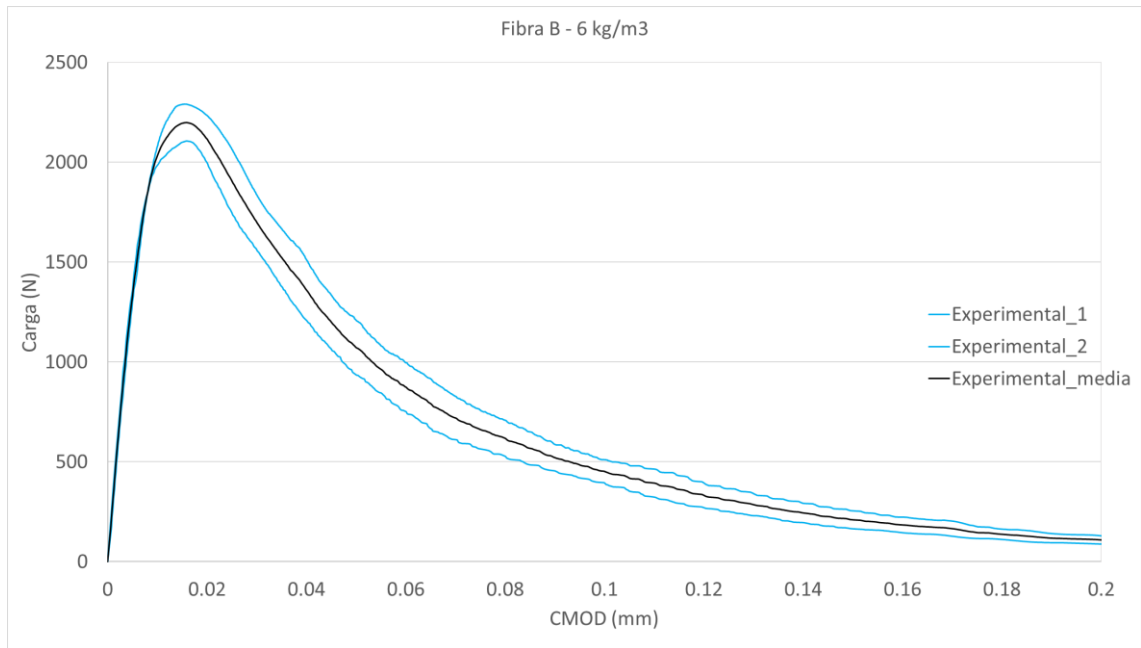
Gráfica 4: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m³ de Fibra B.



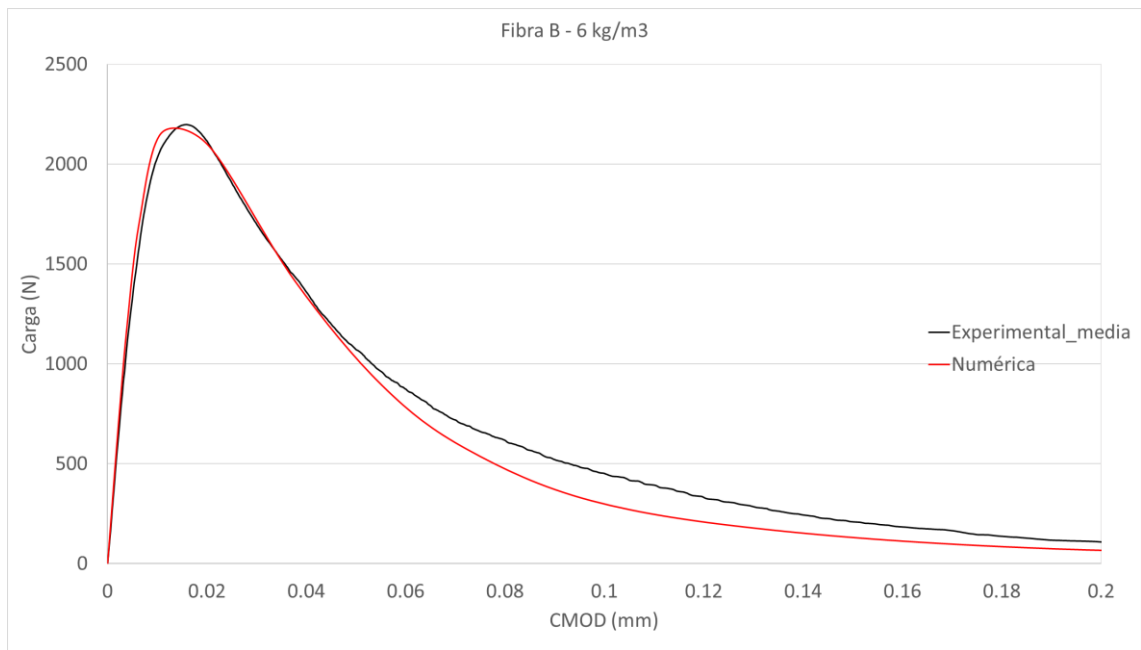
Gráfica 5: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 3 kg/m³ de Fibra B.



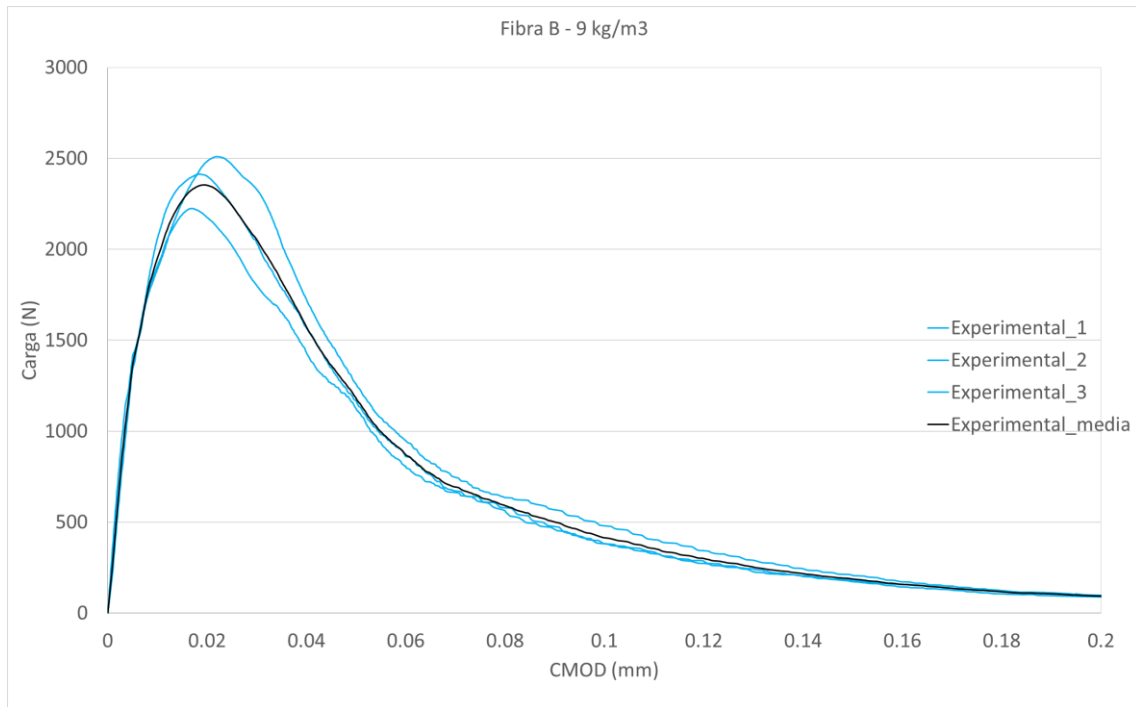
Gráfica 6: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 3 kg/m³ de Fibra B.



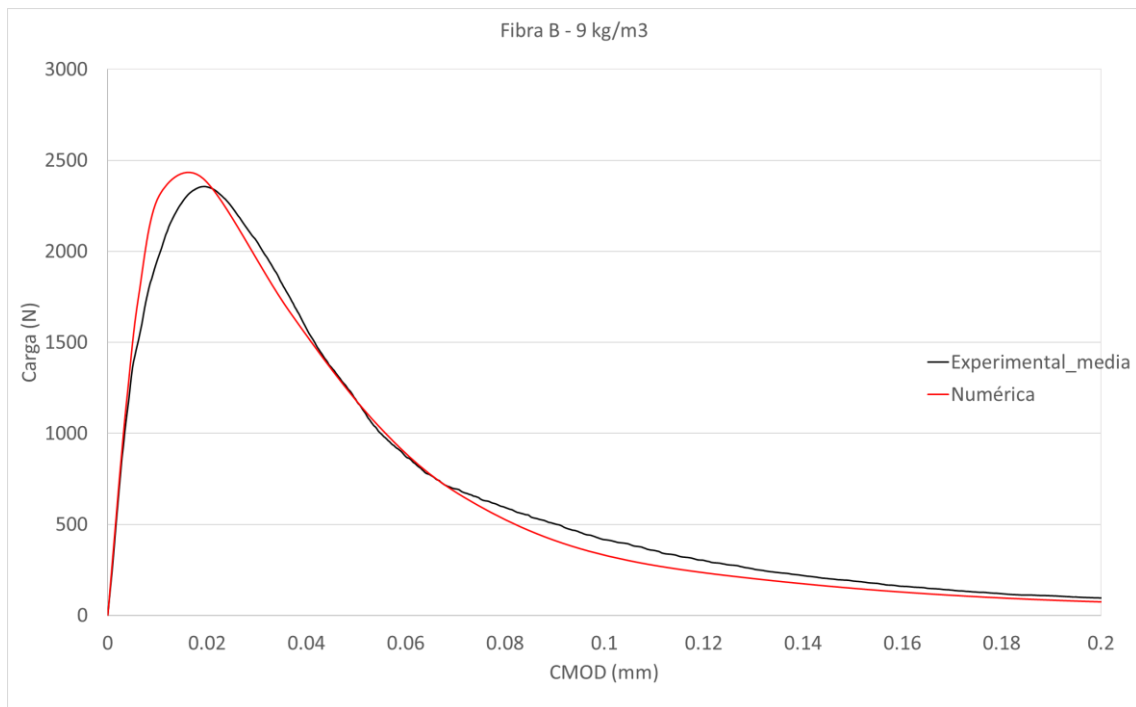
Gráfica 7: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 6 kg/m³ de Fibra B.



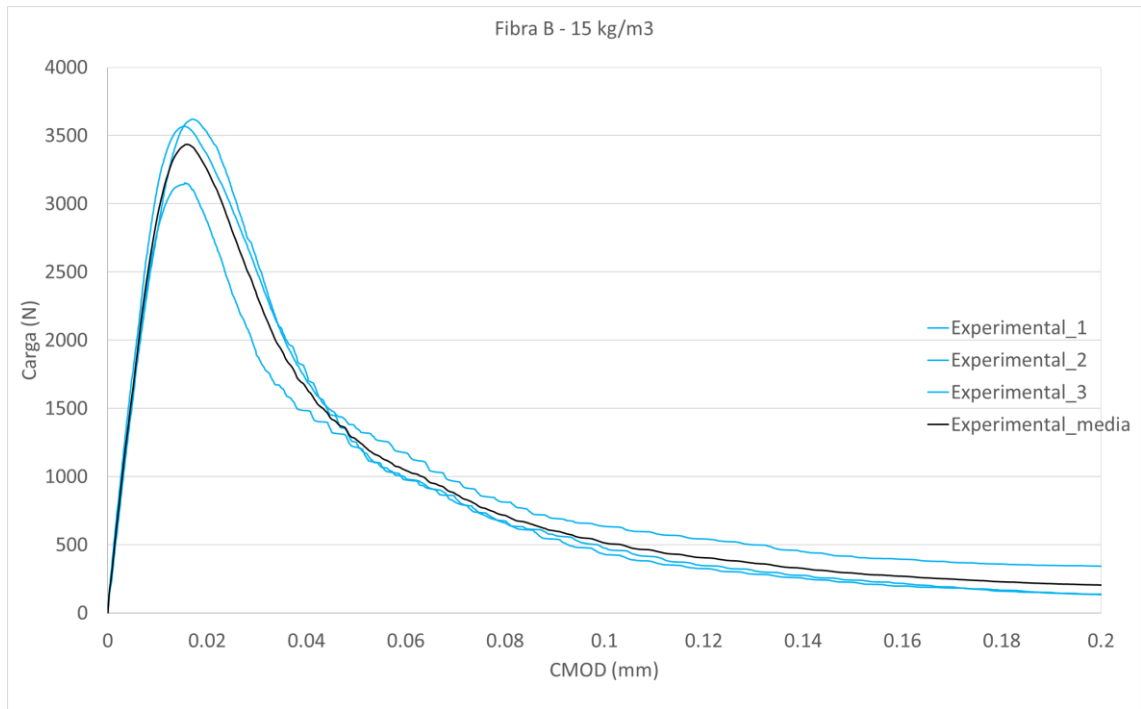
Gráfica 8: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 6 kg/m³ de Fibra B.



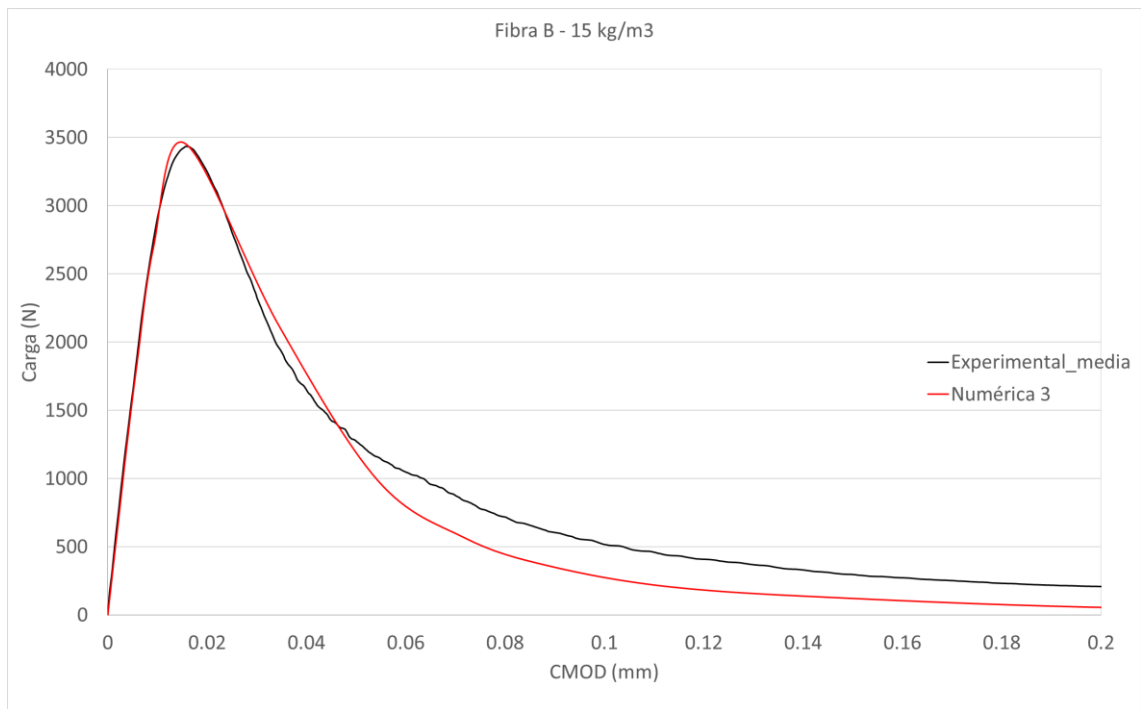
Gráfica 9: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 9 kg/m³ de Fibra B.



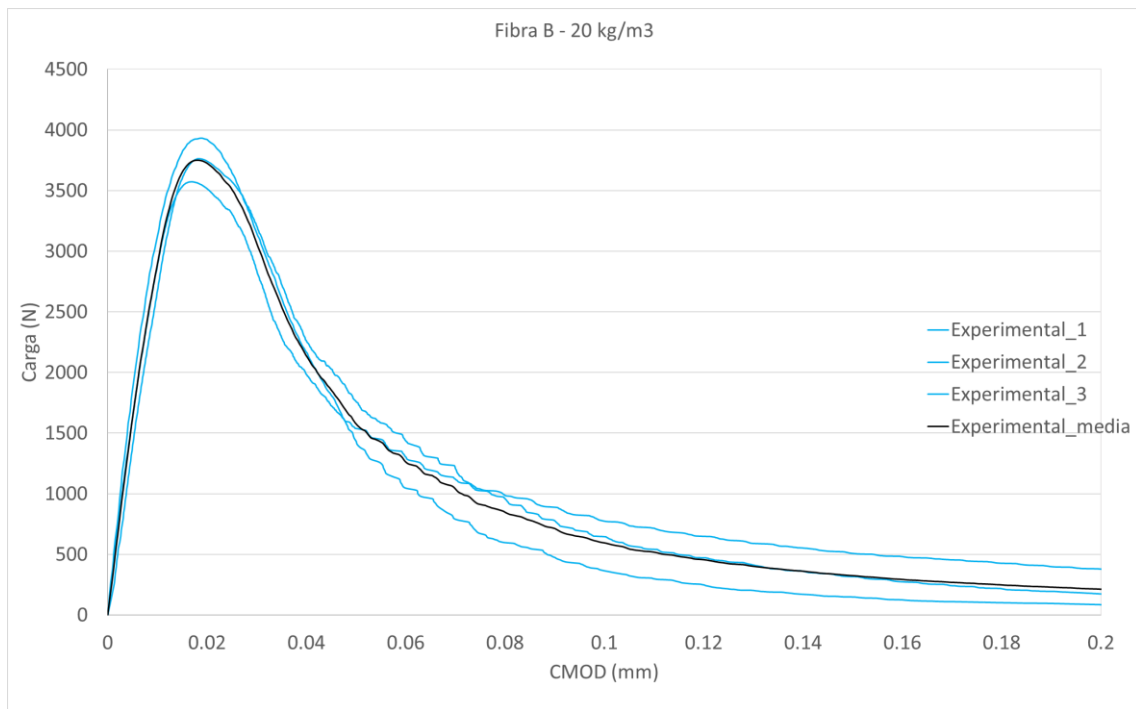
Gráfica 10: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 9 kg/m³ de Fibra B.



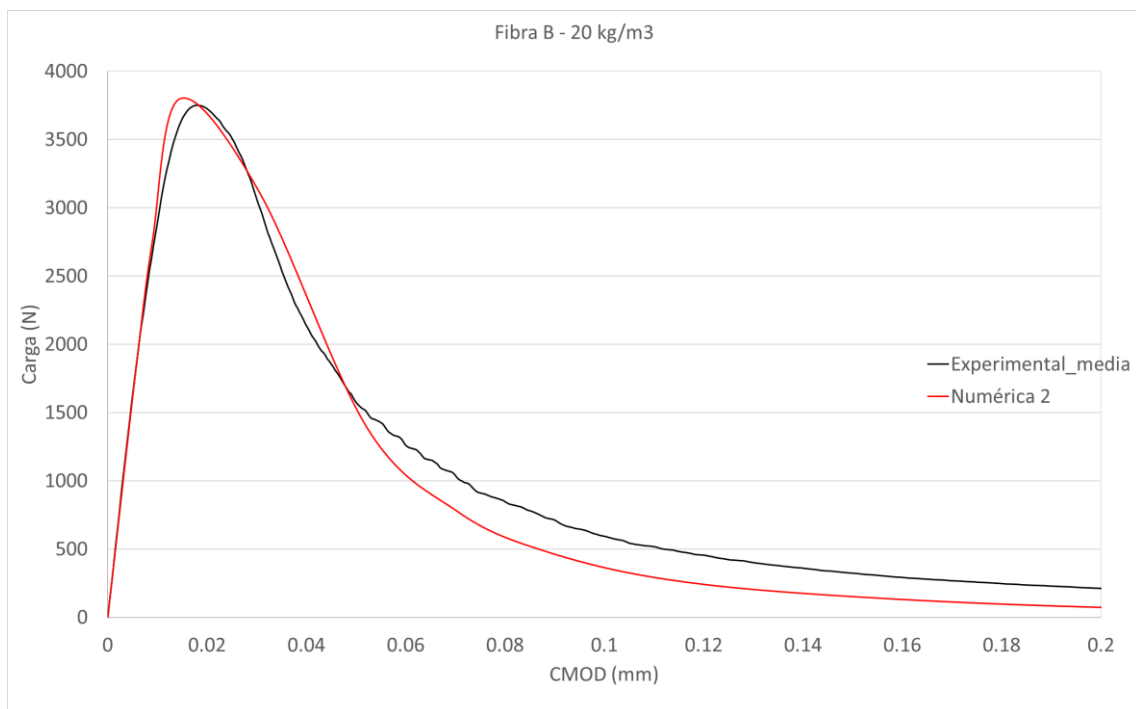
Gráfica 11: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 15 kg/m³ de Fibra B.



Gráfica 12: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 15 kg/m³ de Fibra B.

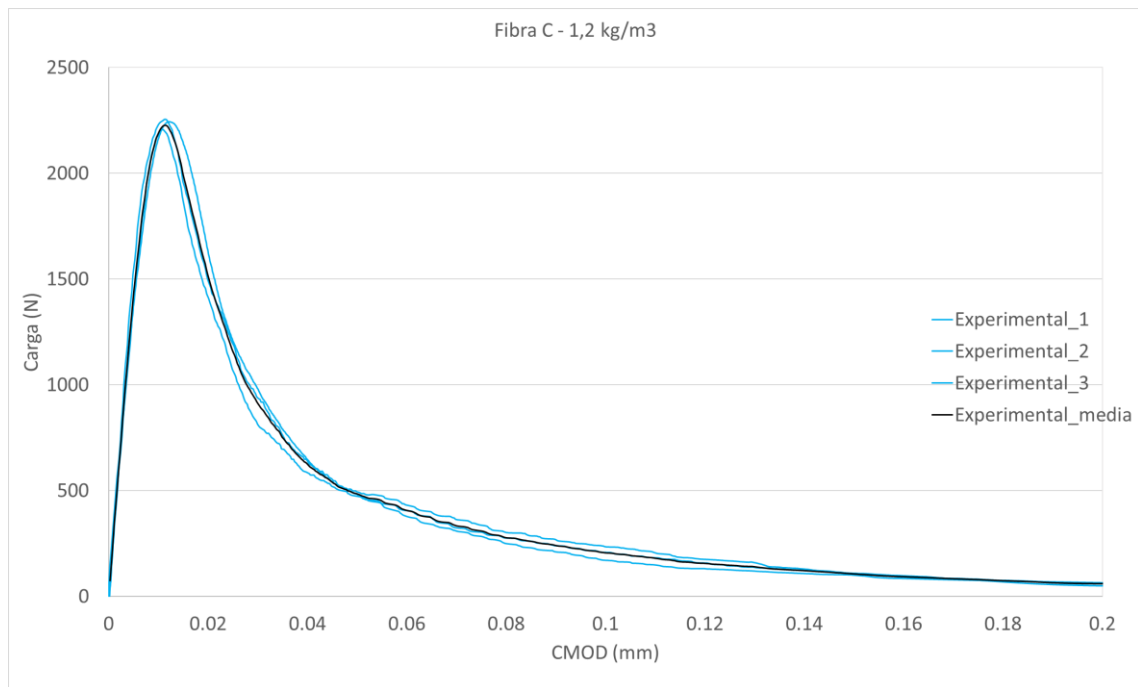


Gráfica 13: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 20 kg/m³ de Fibra B.

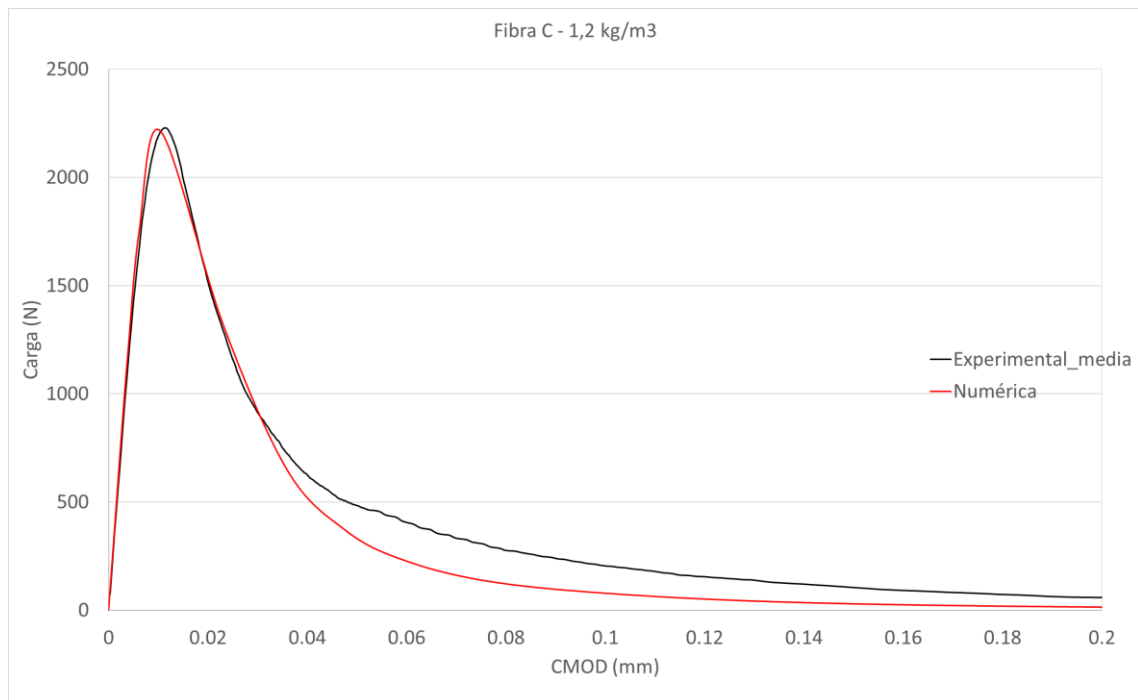


Gráfica 14: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 20 kg/m³ de Fibra B.

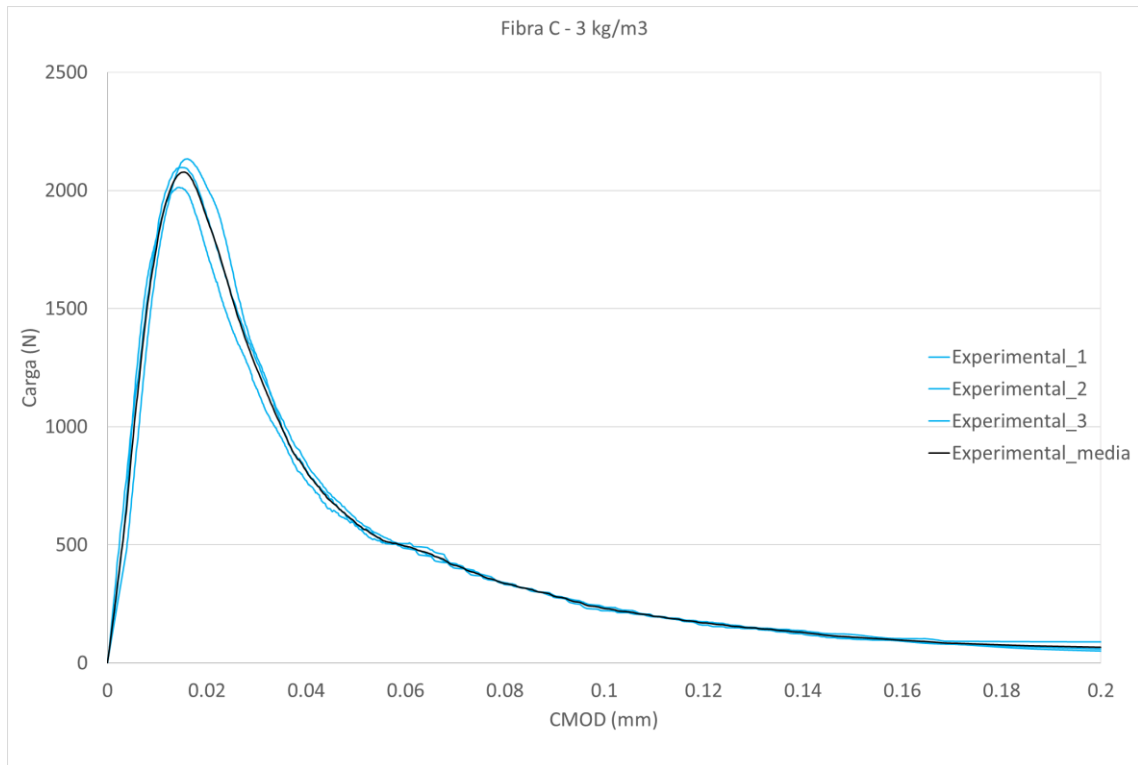
3.2.2.2 Hormigón reforzado con Fibra C



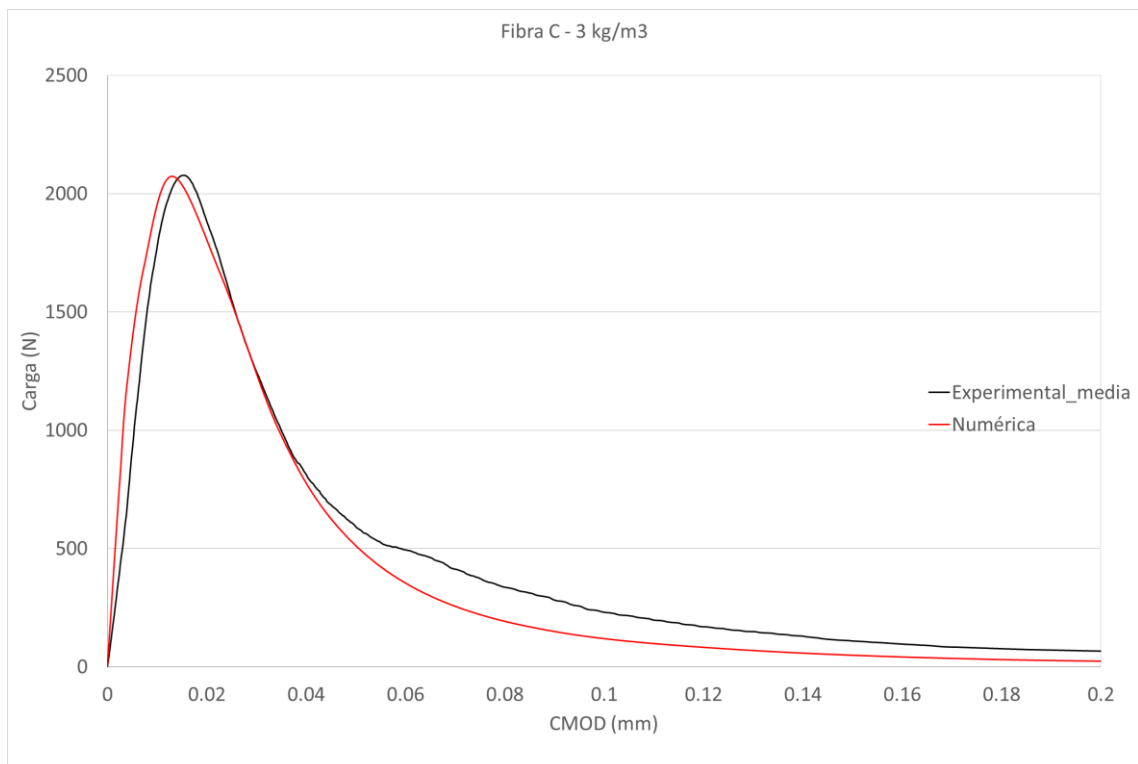
Gráfica 15: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m³ de Fibra C.



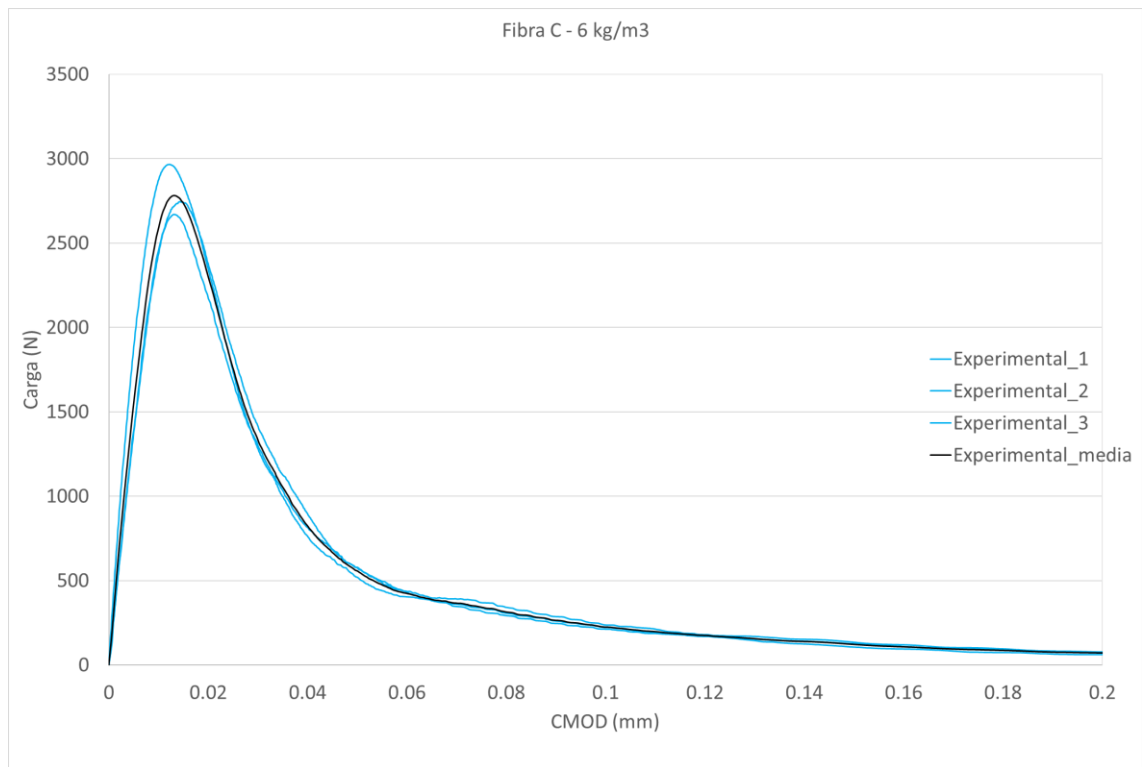
Gráfica 16: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 1,2 kg/m³ de Fibra C.



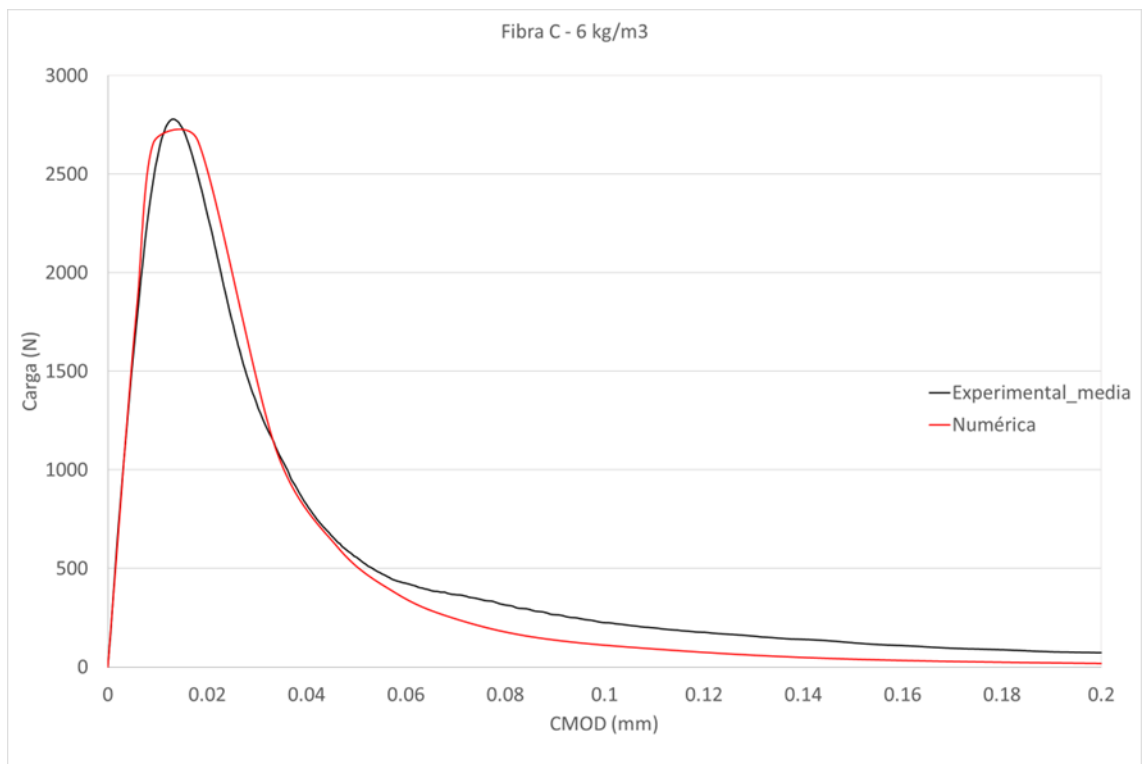
Gráfica 17: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 3 kg/m³ de Fibra C.



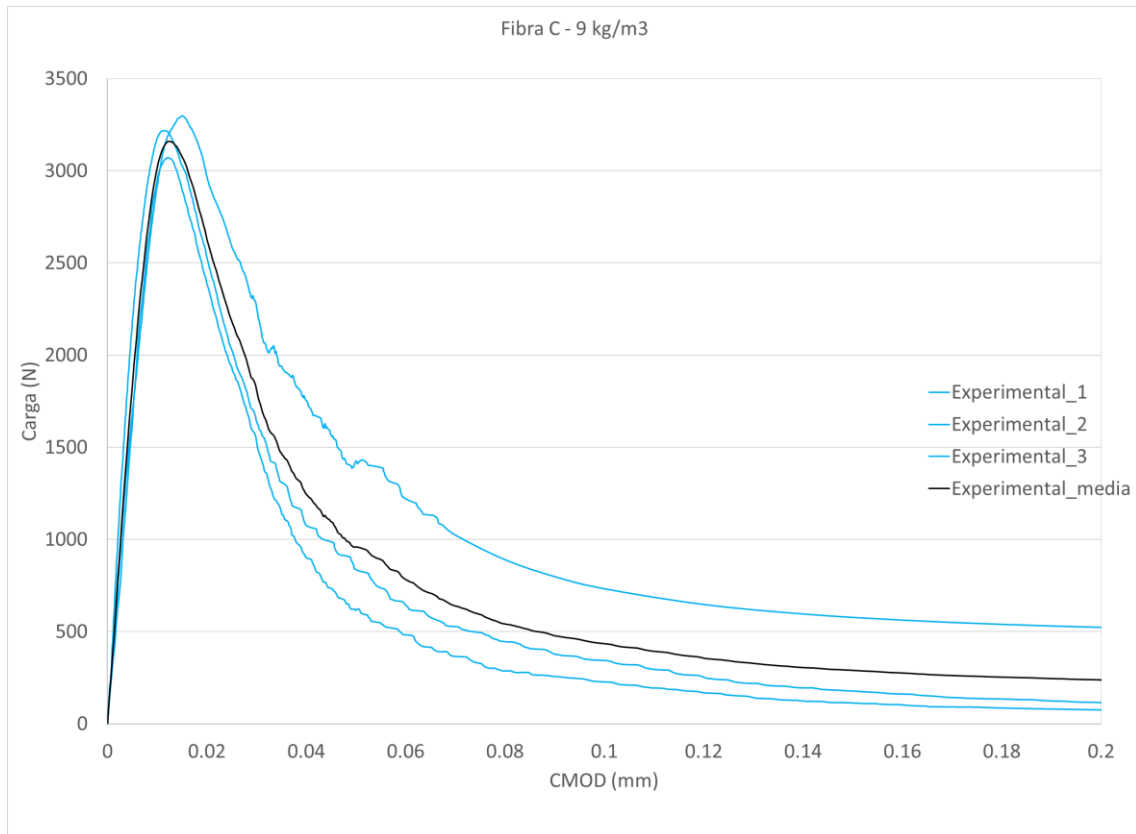
Gráfica 18: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 3 kg/m³ de Fibra C.



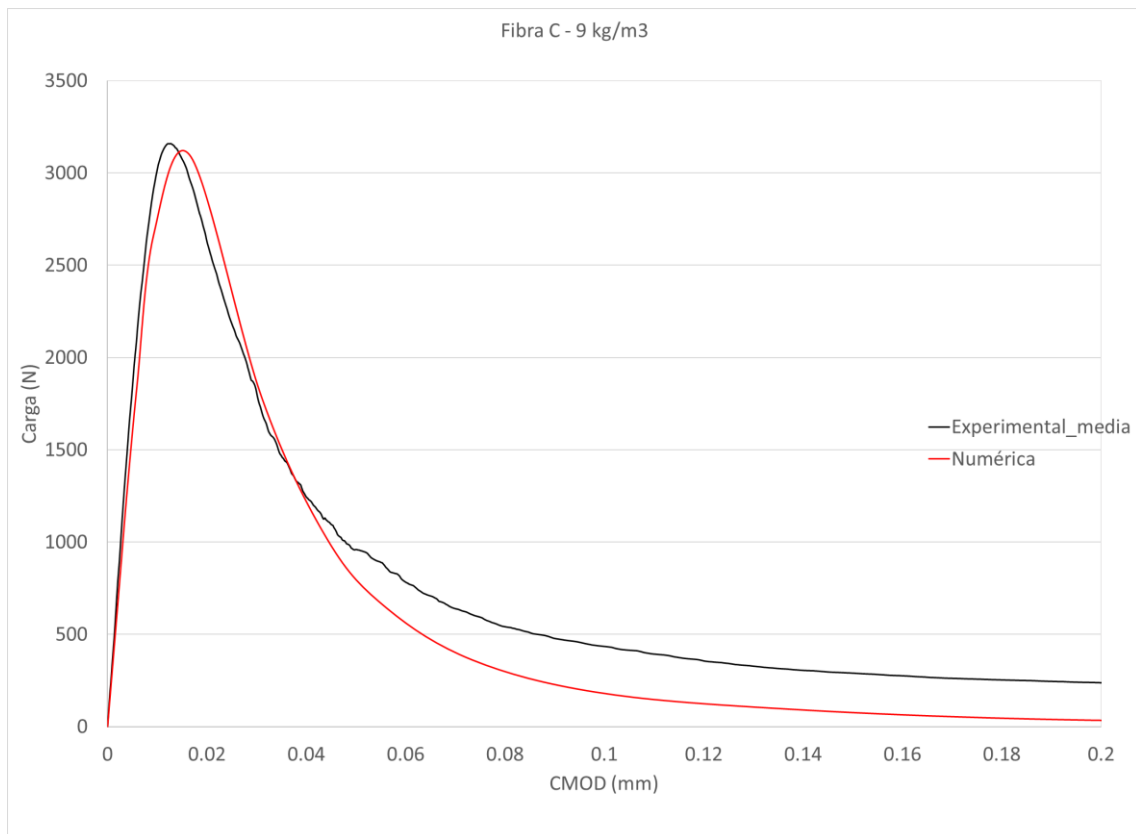
Gráfica 19: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 6 kg/m³ de Fibra C.



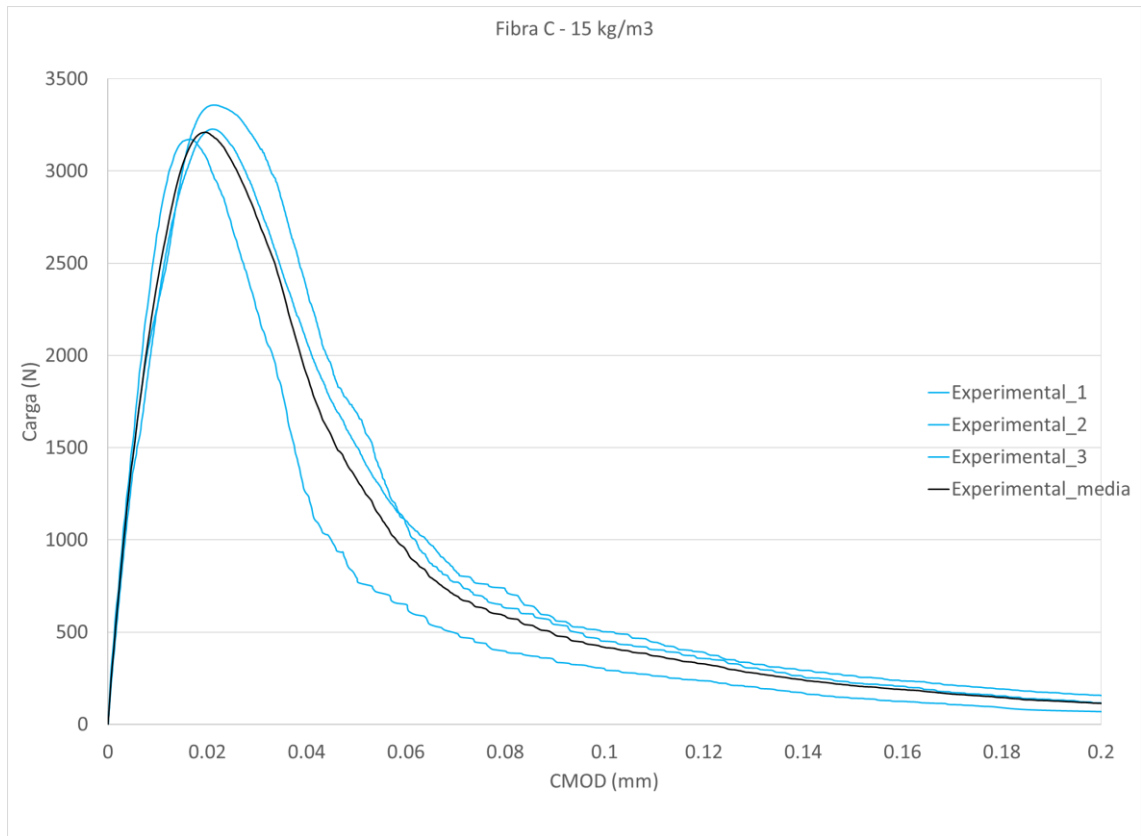
Gráfica 20: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 6 kg/m³ de Fibra C.



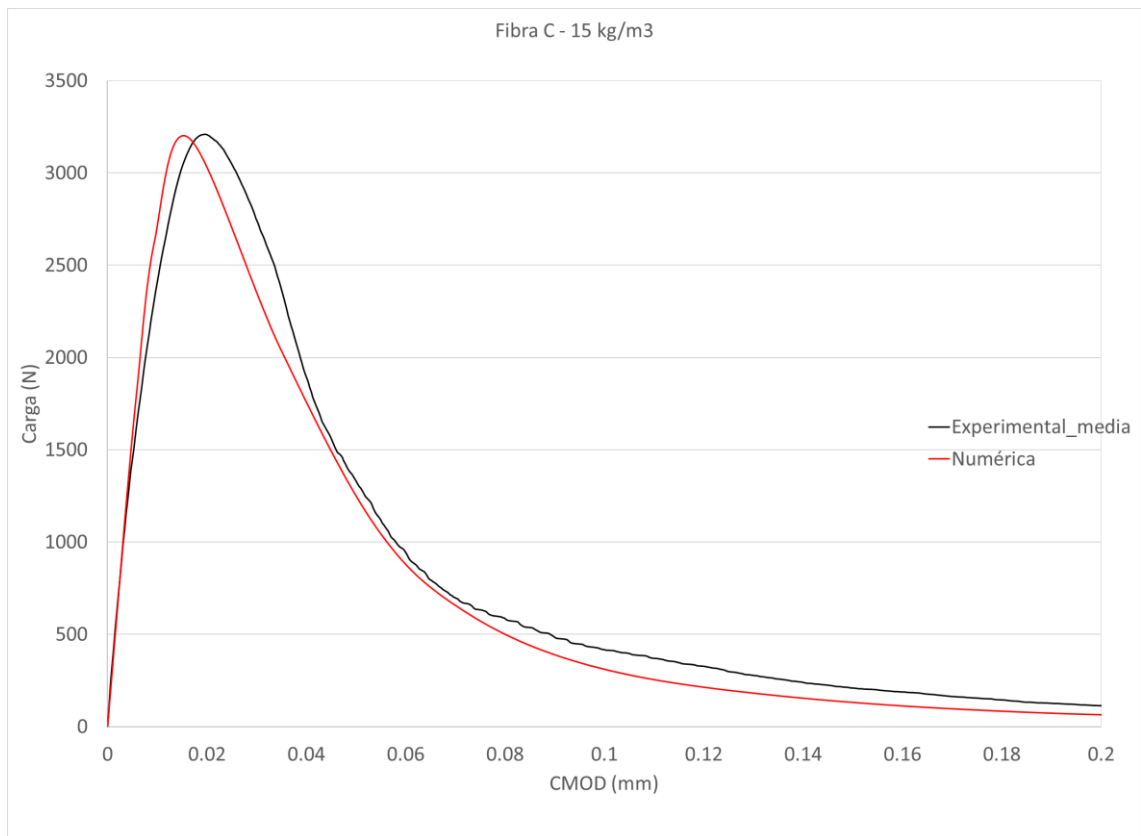
Gráfica 21: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 9 kg/m³ de Fibra C.



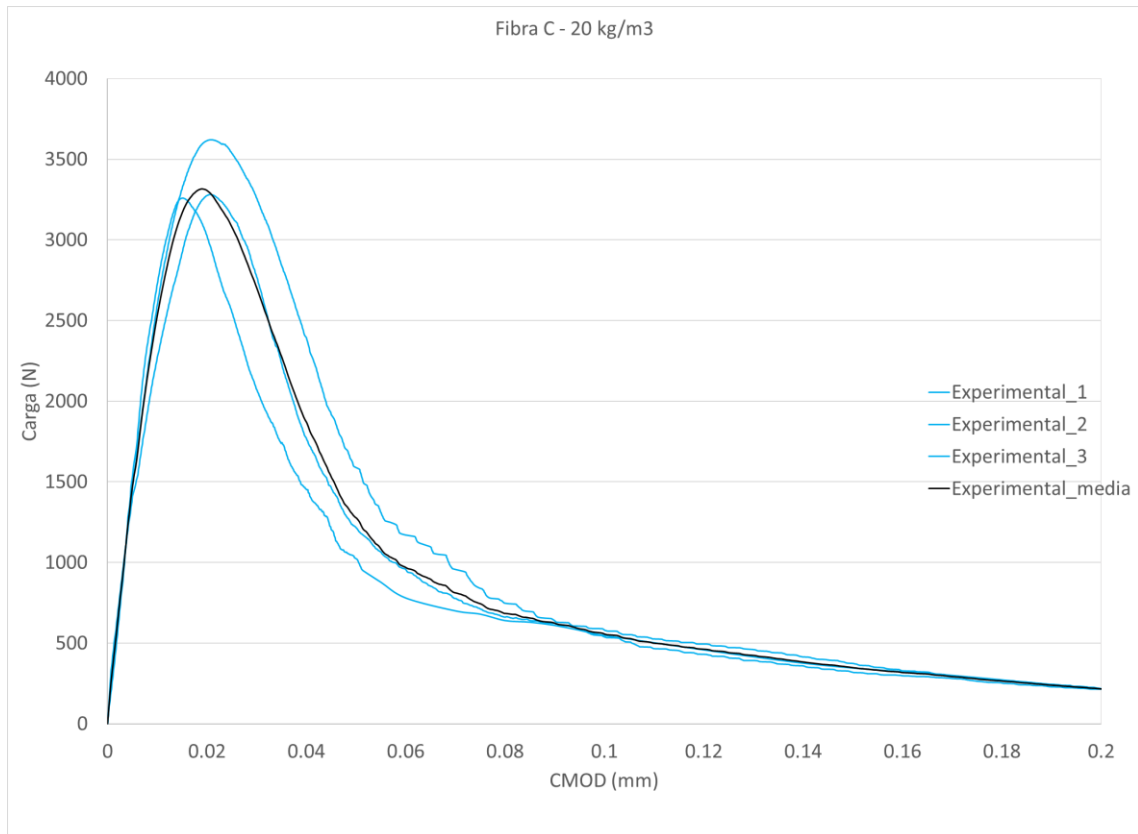
Gráfica 22: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 9 kg/m³ de Fibra C.



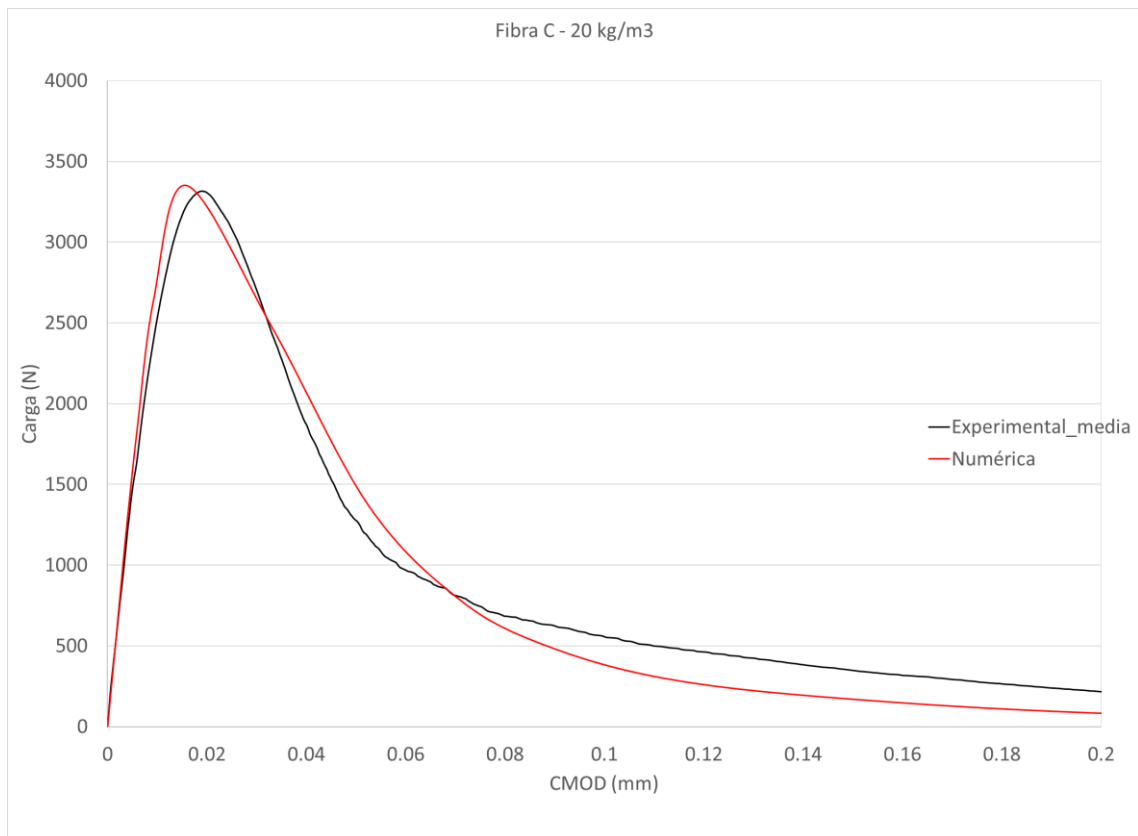
Gráfica 23: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 15 kg/m³ de Fibra C.



Gráfica 24: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 15 kg/m³ de Fibra C.



Gráfica 25: Curvas Experimentales del Hormigón reforzado con 20 kg/m³ de Fibra C.



Gráfica 26: Curvas Experimental y Numérica del Hormigón reforzado con 20 kg/m³ de Fibra C.

4 RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados de las propiedades mecánicas y de fractura obtenidas para cada tipo y cantidad de fibra utilizada en el hormigón de ultra altas prestaciones.

4.1 Parámetros de ajuste de curva Carga - CMOD

Mediante una serie de iteraciones, se han ajustado las propiedades como la resistencia a tracción, módulo de elasticidad y parámetros que determinan la evolución del daño y el daño máximo que puede sufrir el material, hasta lograr una concordancia óptima entre las curvas numérica y experimental para así garantizar que el modelo numérico representa adecuadamente el comportamiento real del hormigón reforzado.

Las propiedades que en ABAQUS determinan la evolución de la grieta en el material cohesivo son el desplazamiento de fallo ('Displacement at failure') y el parámetro exponencial, α , ('Exponential law parameter'). El desplazamiento de fallo representa la magnitud de la deformación o desplazamiento en la zona cohesiva cuando se produce el fallo en el material, al modificar dicho valor, se altera el punto de fallo de la curva numérica y por lo tanto la carga máxima. Por otro lado, el parámetro exponencial influye en la tasa de crecimiento del daño en función de la carga o deformación, modifica la ley exponencial de tracción – separación del material (Figura 11). Al ajustarlo se produce un cambio en la evolución del daño del material a lo largo de la curva, lo afecta directamente a la pendiente de crecimiento de la curva numérica.

La resistencia a la tracción es una propiedad de vital importancia para el análisis del comportamiento de fractura del hormigón. Representa el límite máximo de tracción que el material puede soportar y marca el inicio de la formación de fisuras. Esta resistencia rige la carga máxima que el hormigón puede soportar, por lo que existe una relación entre el valor de la resistencia a la tracción y la carga máxima obtenida en el ensayo de flexión en tres puntos. A medida que aumenta la resistencia a la tracción, se obtienen valores más elevados de carga máxima [1].

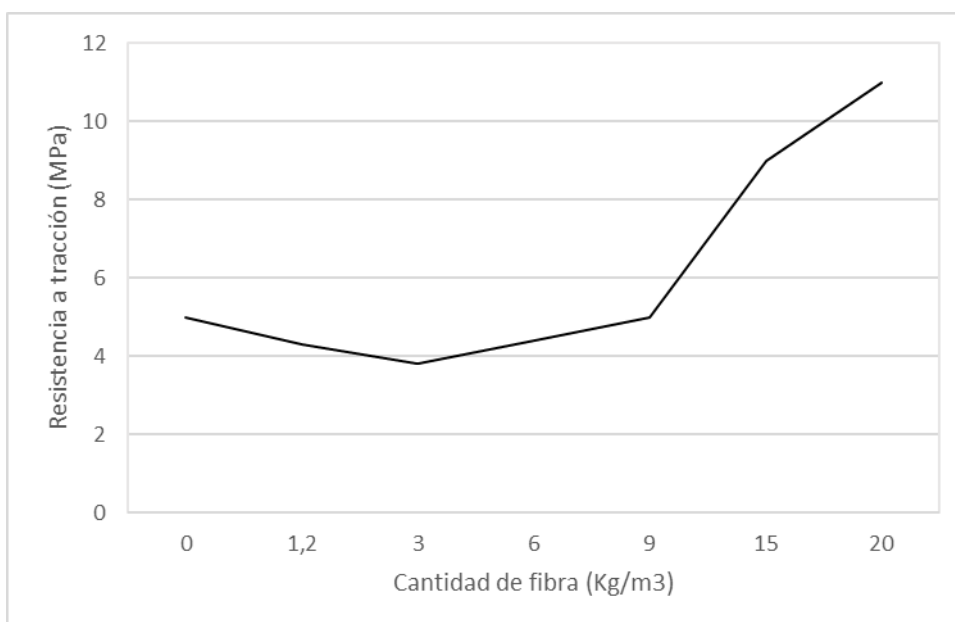
Otra propiedad del material necesaria para la completa definición del comportamiento en fractura del hormigón es el módulo de elasticidad [1]. Esta propiedad mide la rigidez y la capacidad de un material para deformarse elásticamente bajo la acción de fuerzas externas, representa la relación entre el esfuerzo aplicado al material y la deformación elástica resultante, por lo que es fundamental para determinar el comportamiento de un material.

4.1.1 Hormigón reforzado con Fibra B

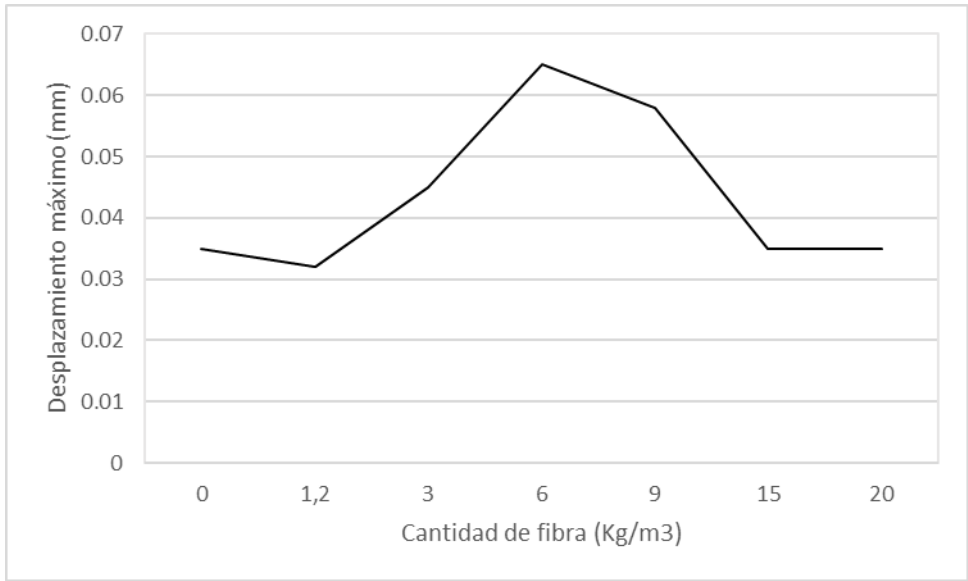
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las distintas cantidades de fibra B añadida a la mezcla de hormigón.

PROPIEDADES	CANTIDAD DE FIBRA - FIBRA B (KG/M3)						
	0	1,2	3	6	9	15	20
Resistencia a tracción (MPa)	5	4.3	3.8	4.4	5	9	11
Desplazamiento máximo (mm)	0.035	0.032	0.045	0.065	0.058	0.035	0.035
Parámetro Ley Exponencial	5	3	3	4	3.5	3.5	3.5
Módulo Elasticidad (MPa)	30000	20000	25000	25000	24500	26500	26500

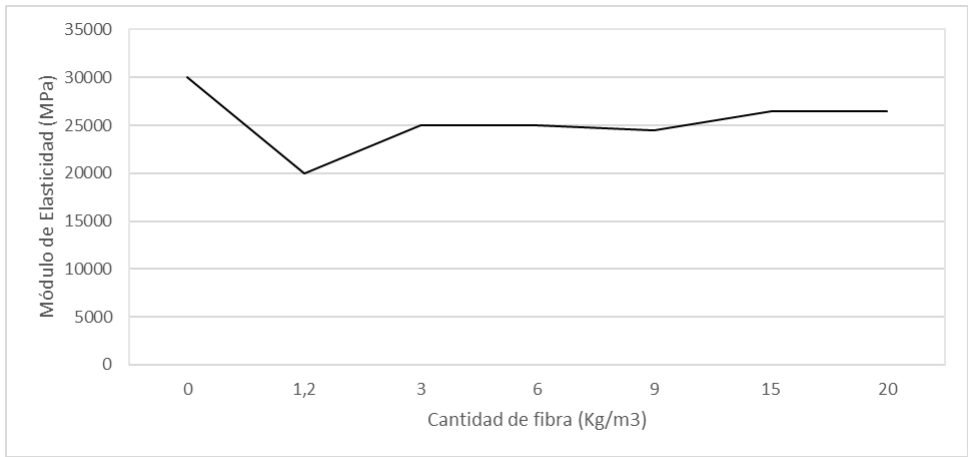
Tabla 2: Resolución de las propiedades del hormigón reforzado con la Fibra B.



Gráfica 27: Representación Resistencia a tracción – Cantidad de fibra. Fibra B.



Gráfica 28: Desplazamiento máximo – Cantidad de fibra. Fibra B.



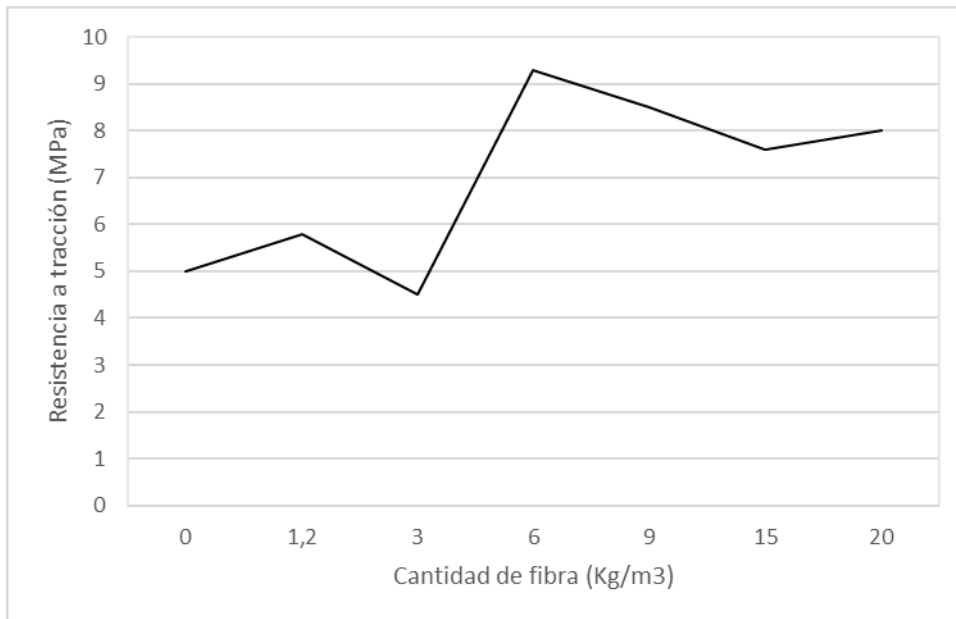
Gráfica 29: Módulo Elasticidad - Cantidad de fibra. Fibra B.

4.1.2 Hormigón reforzado con Fibra C

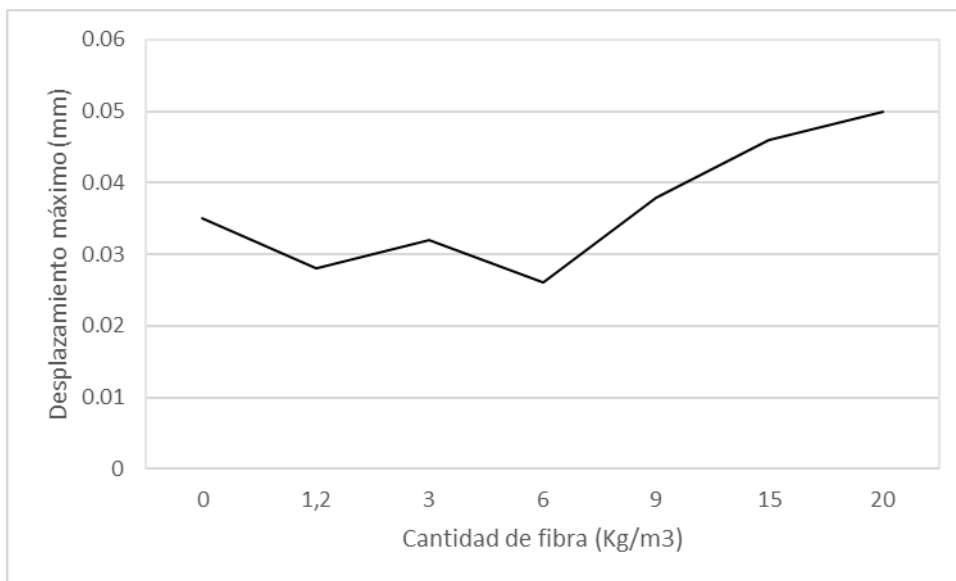
A continuación, se muestran las propiedades que se han obtenido para las distintas cantidades de fibra C.

PROPIEDADES	CANTIDAD DE FIBRA - FIBRA C (KG/M3)						
	0	1,2	3	6	9	15	20
Resistencia a tracción (MPa)	5	5.8	4.5	9.3	8.5	7.6	8
Desplazamiento máximo (mm)	0.035	0.028	0.032	0.026	0.038	0.046	0.05
Parámetro Ley Exponencial	5	4.5	3	4.8	5	4	4
Módulo Elasticidad (MPa)	30000	17500	18000	25000	28000	26000	25000

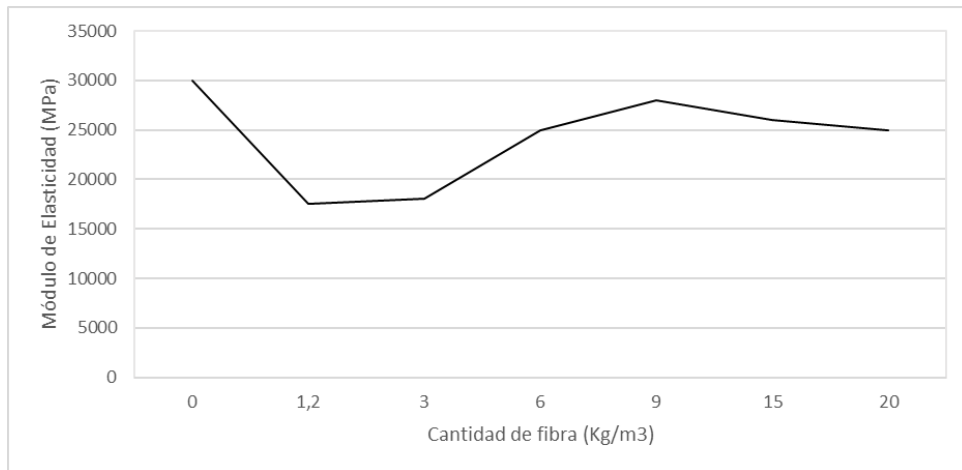
Tabla 3: Valores para las propiedades del hormigón reforzado con la Fibra C.



Gráfica 30: Resistencia a tracción – Cantidad de fibra. Fibra C.



Gráfica 31: Desplazamiento máximo – Cantidad de fibra. Fibra C.



Gráfica 32: Módulo Elasticidad - Cantidad de fibra. Fibra C.

4.2 Ley cohesiva

Para completar el análisis del comportamiento del material, se estudia la Ley de tracción – separación en la zona donde se producirá la primera grieta en el material, es decir, en la zona cohesiva. Esta ley, denominada también Ley cohesiva, se definirá mediante la siguiente expresión $\sigma = f_t e^{-\alpha w}$, y depende de manera directa de la tensión de rotura por tracción, f_t , el desplazamiento máximo de la grieta, w_u , y el parámetro exponencial, α [6]. Además, también se analiza la energía de fractura, G_f , para cada tipo y cantidad de fibra, este valor será definido mediante el área completa encerrada bajo la curva exponencial (Figura 11).

La energía de fractura es la energía consumida en la creación y desarrollo del fallo del material, se define también como la cantidad de energía necesaria para la creación de una grieta de superficie unidad en el hormigón [1], por lo que la energía de fractura es uno de los parámetros más importantes para la caracterización del comportamiento en fractura del hormigón.

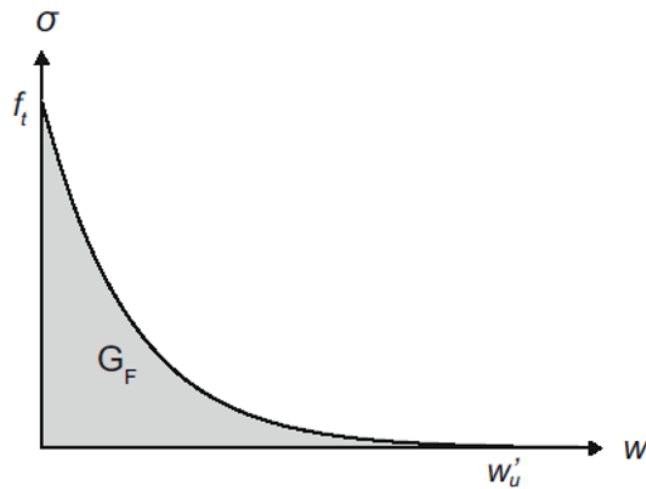


Figura 11: Ley exponencial de tracción – separación.

Para obtener una representación más precisa del comportamiento real del material, se ha determinado un diagrama bilineal equivalente a la ley exponencial (Figura 12). Este diagrama está definido por la tensión de rotura por tracción, f_t , la apertura máxima de la grieta, w_u , y las pendientes a_1 y a_2 . la pendiente de la primera rama, a_1 , está relacionada con la microfisuración que se produce en el hormigón, y aumenta con un incremento de la fracción volumétrica de árido grueso y de la relación pasta/sólido [7].

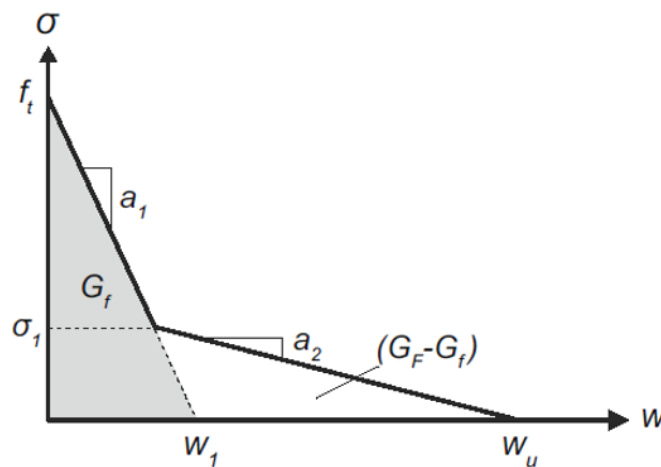


Figura 12: Ley bilineal de tracción - separación

La representación del diagrama bilineal equivalente a la ley exponencial se ha realizado haciendo uso de Matlab. En la siguiente figura se observa la superposición de la ley exponencial y bilineal para el hormigón de referencia y en los subapartados que se presentan a continuación se muestran las curvas de Ley Cohesiva así como los parámetros que la definen para los distintos tipos de hormigones.

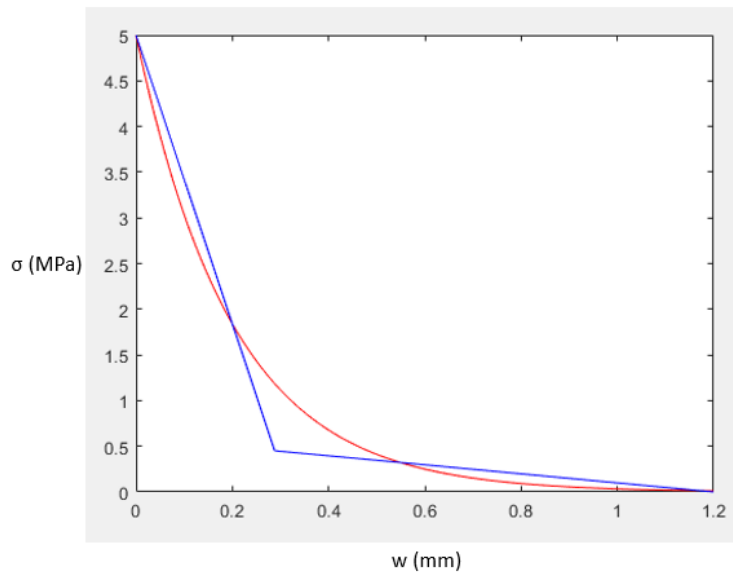
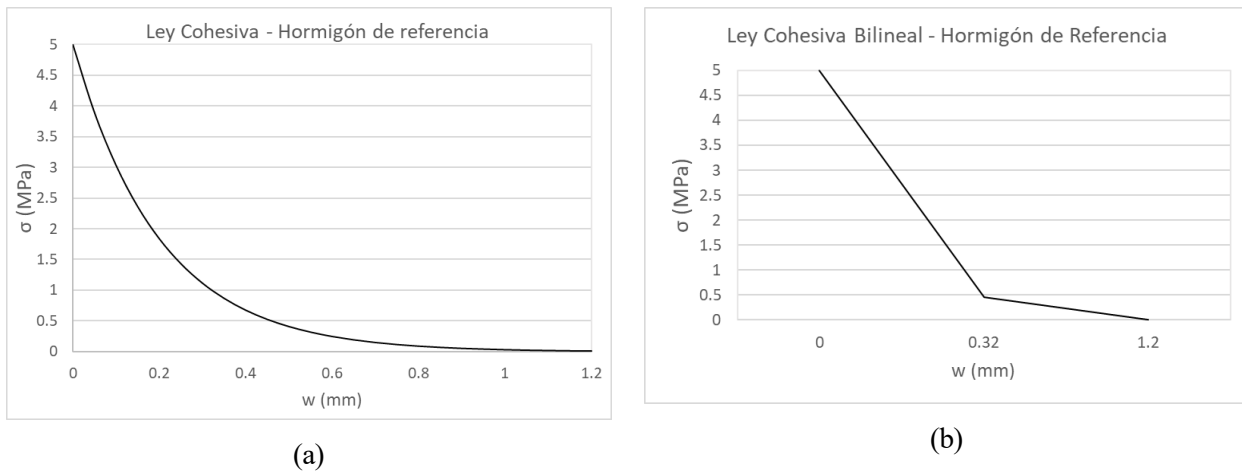


Figura 13: Representación de la Ley de tracción – separación. Exponencial y Bilineal superpuestas para el Hormigón de Referencia.

4.2.1 Hormigón de Referencia

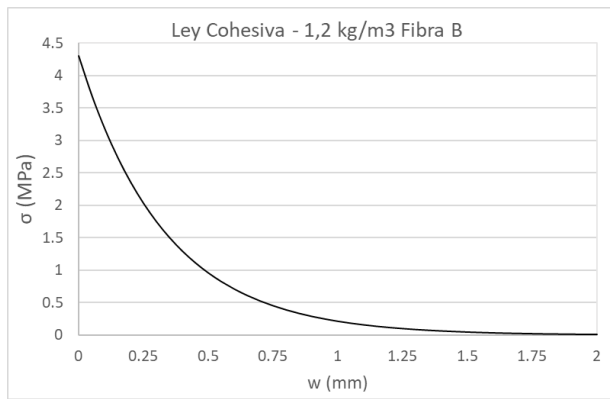


Gráfica 33: Ley de tracción - separación de Hormigón de Referencia. (a) Exponencial (b) Bilineal

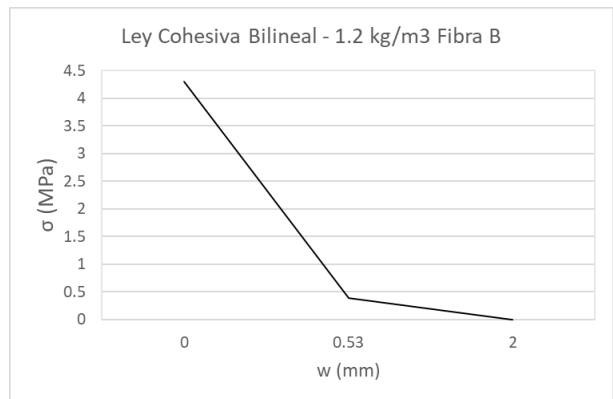
PARÁMETROS	HORMIGÓN DE REFERENCIA
f_t (MPa)	5
w_u (mm)	0.3165
a_1	15.7986
a_2	0.4934
Energía Fractura	1

Tabla 4: Parámetros Ley tracción – separación para Hormigón de referencia.

4.2.2 Hormigón reforzado con Fibra B

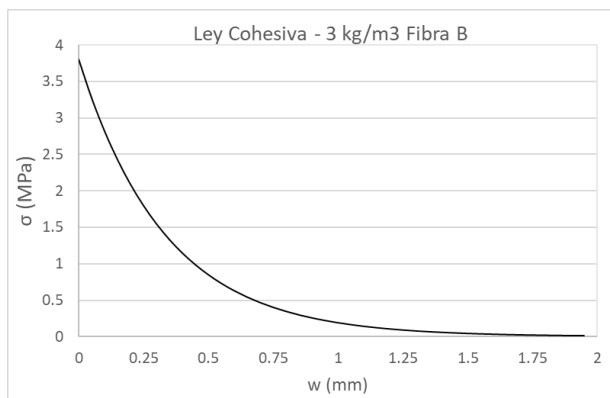


(a)

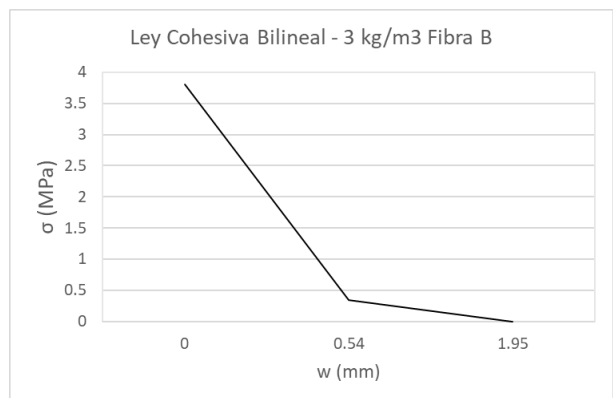


(b)

Gráfica 34: Ley de tracción - separación Hormigón con 1,2 kg/m³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal

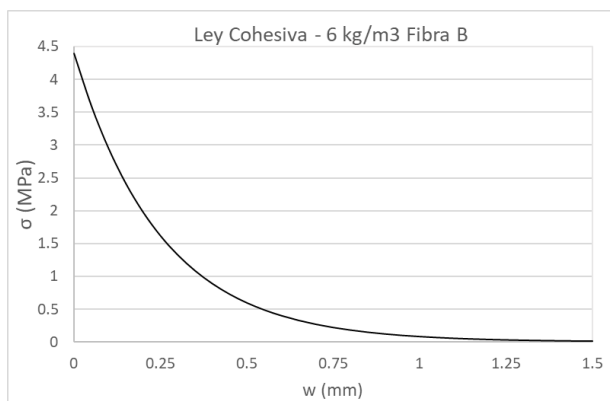


(a)

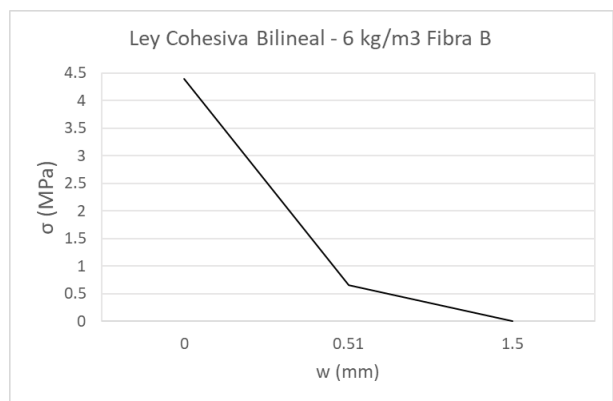


(b)

Gráfica 35: Ley de tracción - separación Hormigón con 3 kg/m³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal

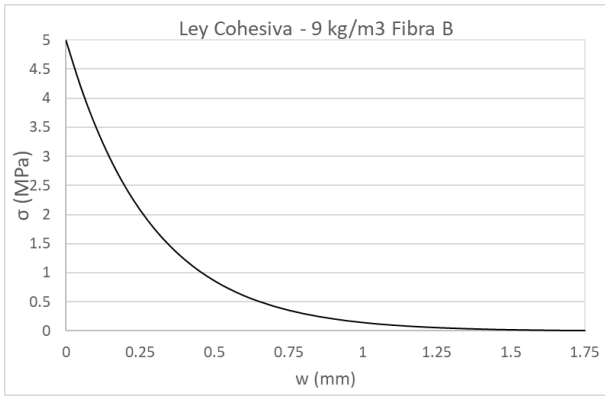


(a)

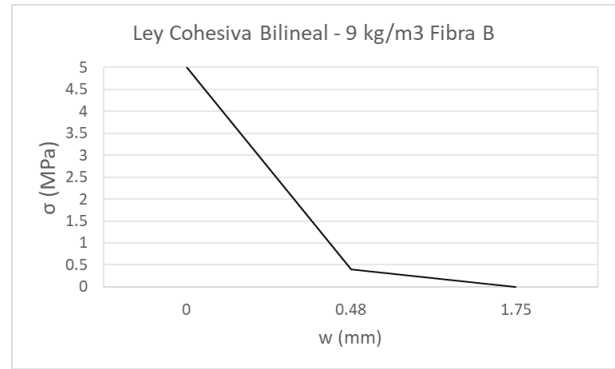


(b)

Gráfica 36: Ley de tracción - separación Hormigón con 6 kg/m³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal

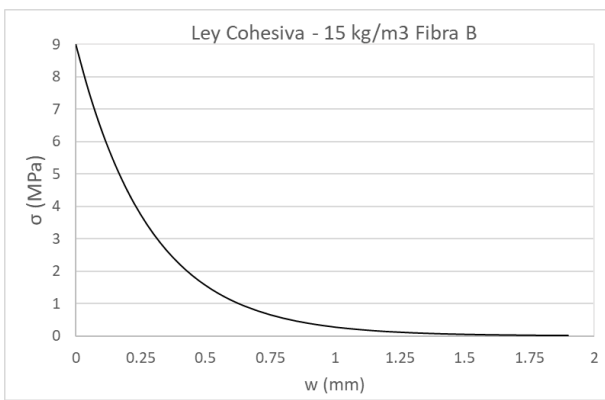


(a)



(b)

Gráfica 37: Ley de tracción - separación Hormigón con 9 kg/m³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal

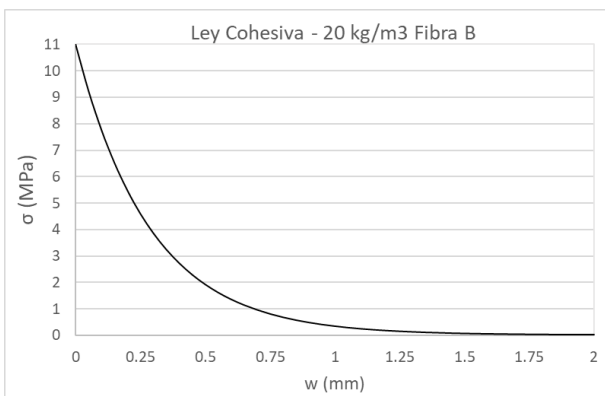


(a)

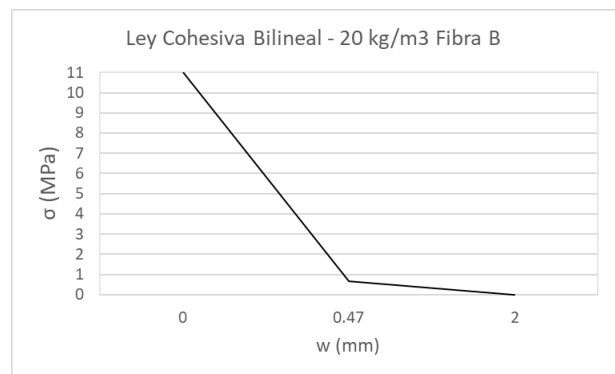


(b)

Gráfica 38: Ley de tracción - separación Hormigón con 15 kg/m³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal



(a)

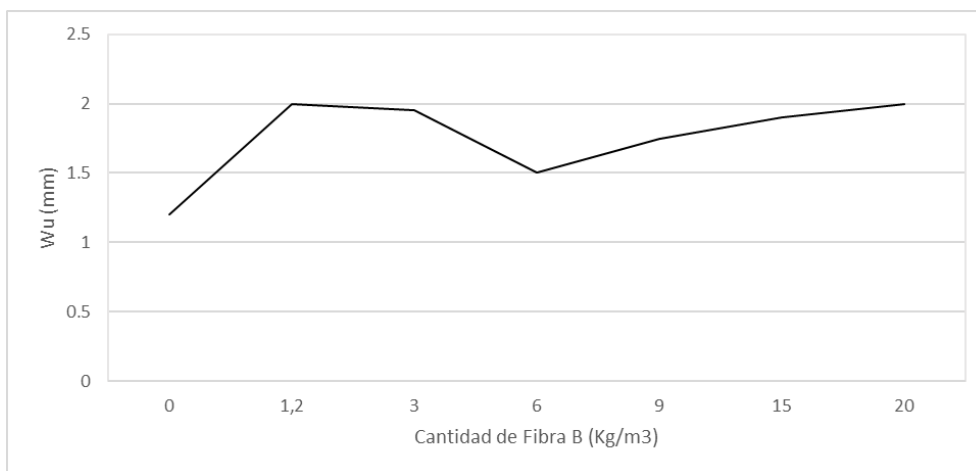


(b)

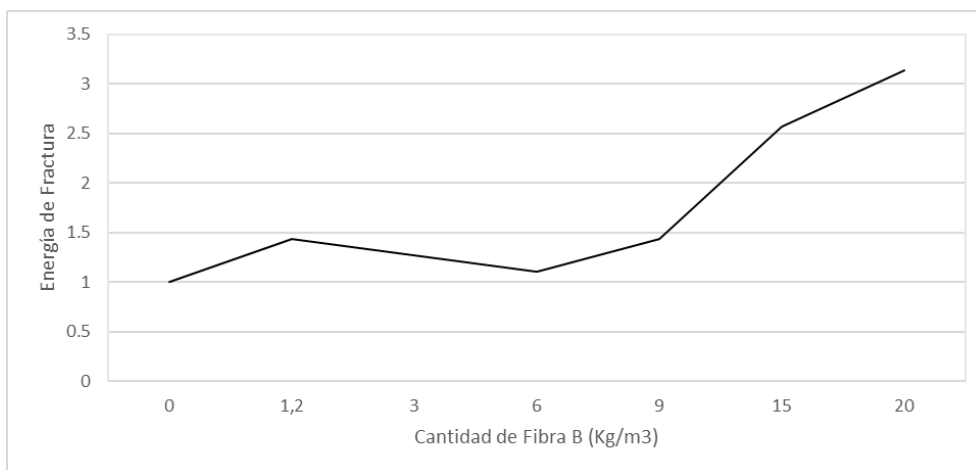
Gráfica 39: Ley de tracción - separación Hormigón con 20 kg/m³ de Fibra B. (a) Exponencial (b) Bilineal

PARÁMETROS	CANTIDAD DE FIBRA - FIBRA B (KG/M ³)					
	1.2	3	6	9	15	20
f_t (MPa)	4.3	3.8	4.4	5	9	11
w_u (mm)	2	1.95	1.5	1.75	1.9	2
a_1	8.152	7.093	8.598	10.514	19.153	23.500
a_2	0.2546	0.2338	0.6197	0.3048	0.4306	0.4231
Energía de Fractura	1.43	1.26	1.1	1.43	2.57	3.14

Tabla 5: Parámetros Ley tracción – separación para Hormigón con Fibra B.

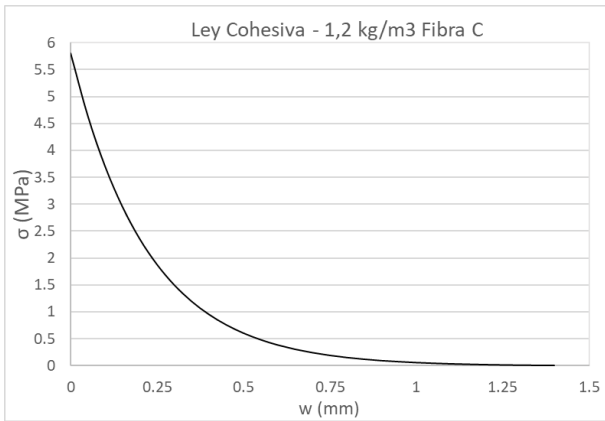


Gráfica 40: Apertura máxima de grieta – Cantidad de fibra. Fibra B

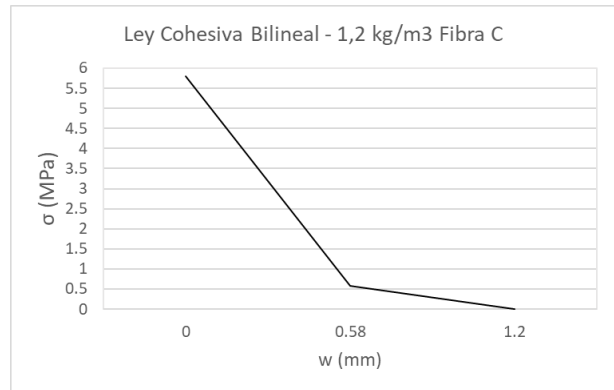


Gráfica 41: Energía de Fractura – Cantidad de fibra. Fibra B.

4.2.3 Hormigón reforzado con Fibra C

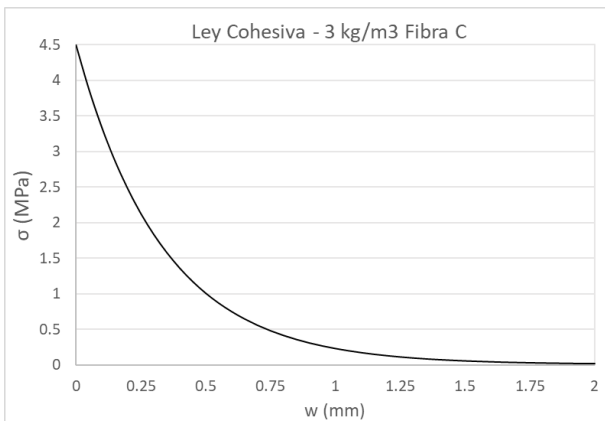


(a)

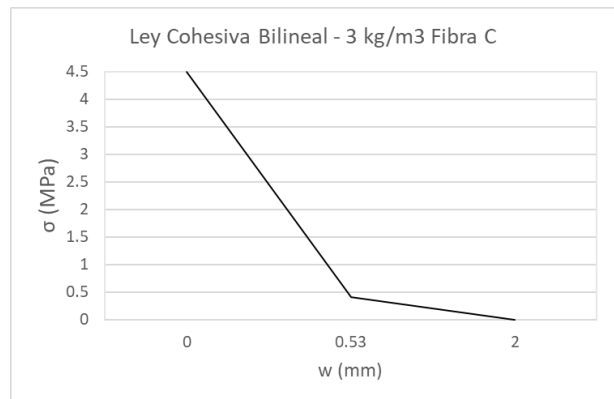


(b)

Gráfica 42: Ley de tracción - separación Hormigón con 1,2 kg/m³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal

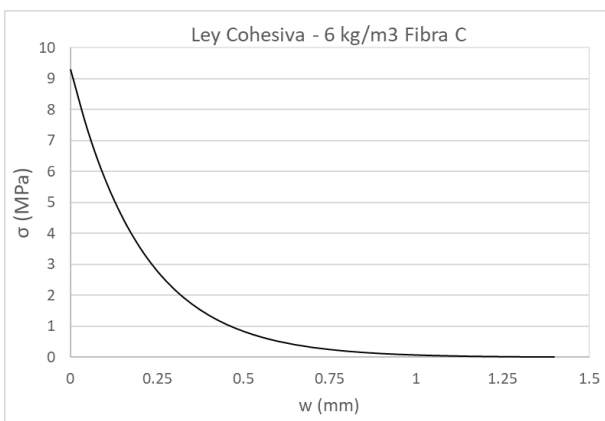


(a)

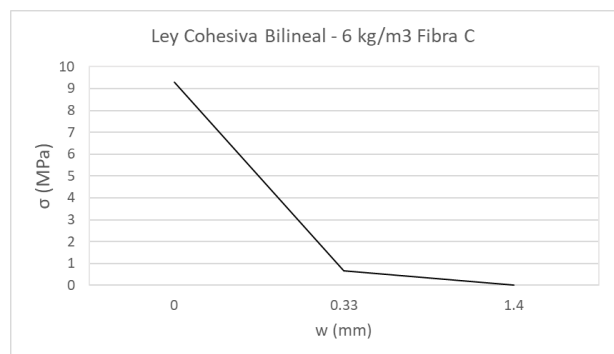


(b)

Gráfica 43: Ley de tracción - separación Hormigón con 3 kg/m³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal

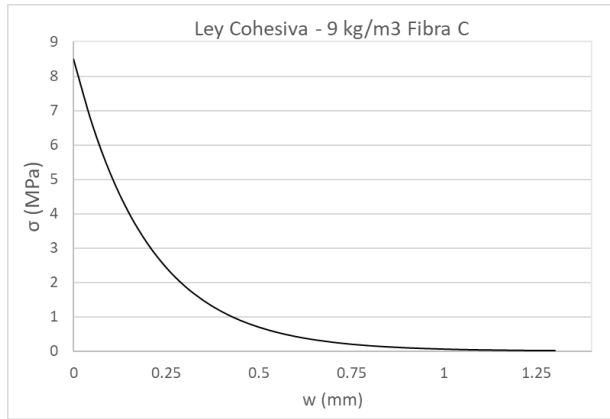


(a)

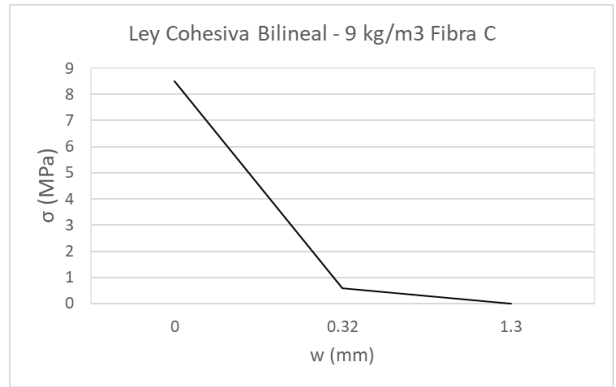


(b)

Gráfica 44: Ley de tracción - separación Hormigón con 6 kg/m³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal

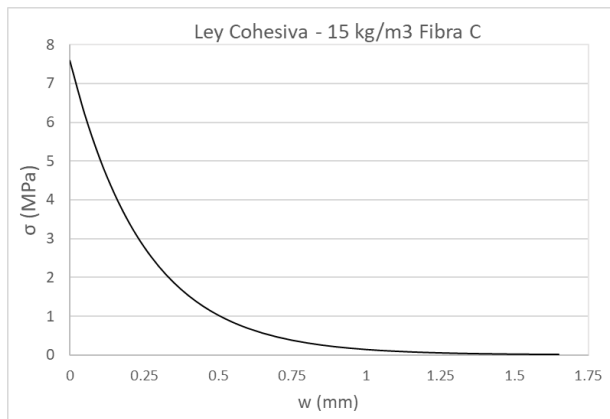


(a)

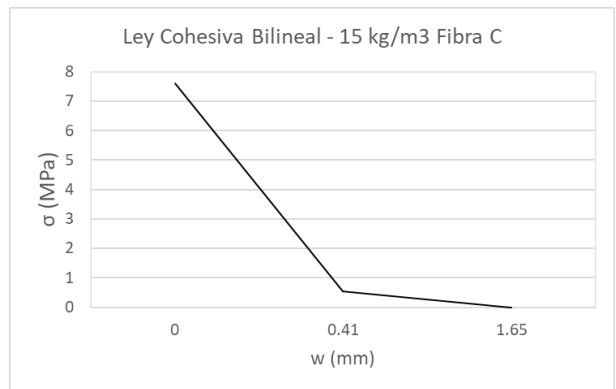


(b)

Gráfica 45: Ley de tracción - separación Hormigón con 9 kg/m³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal

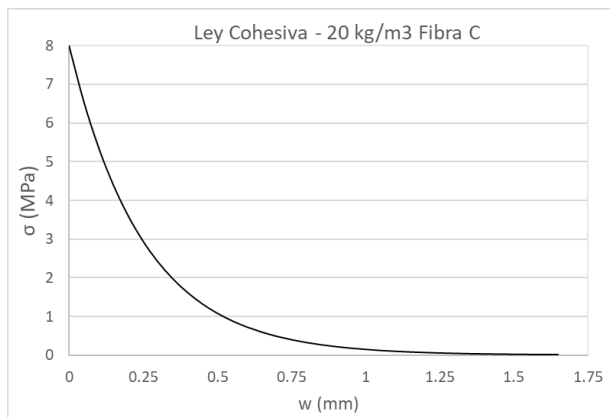


(a)

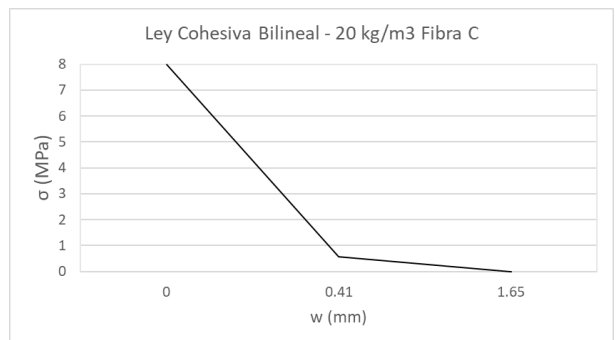


(b)

Gráfica 46: Ley de tracción - separación Hormigón con 15 kg/m³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal



(a)

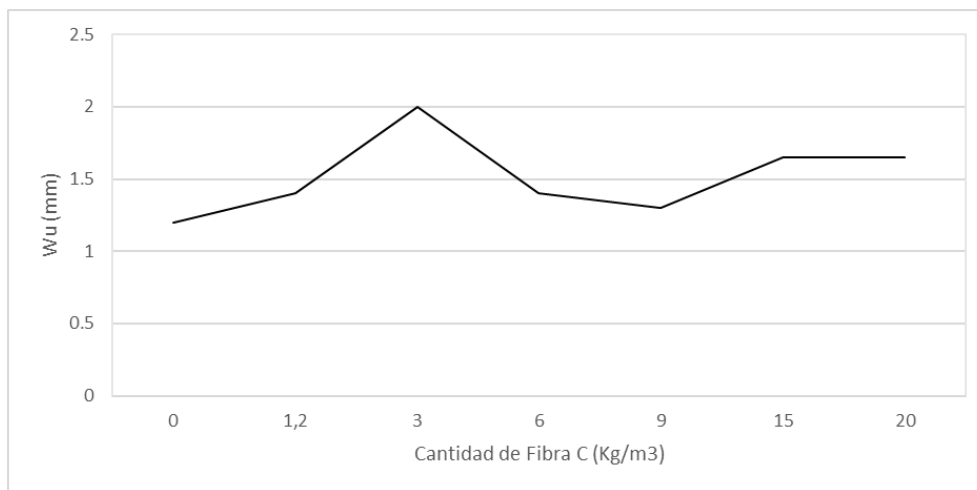


(b)

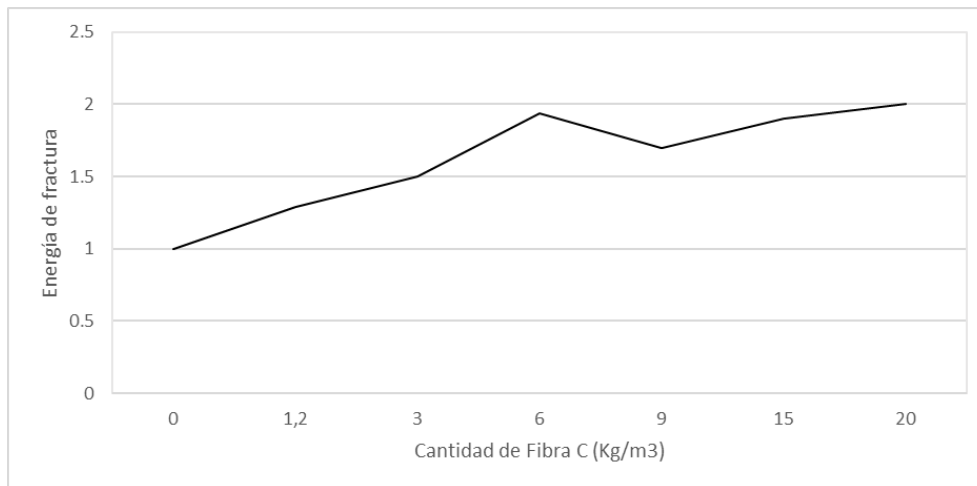
Gráfica 47: Ley de tracción - separación Hormigón con 20 kg/m³ de Fibra C. (a) Exponencial (b) Bilineal

PARÁMETROS	CANTIDAD DE FIBRA - FIBRA C (KG/M ³)					
	1.2	3	6	9	15	20
f_t (MPa)	5.8	4.5	9.3	8.5	7.6	8
W_u (mm)	1.2	2	1.4	1.3	1.65	1.65
a_1	16.111	8.531	28.081	26.438	18.625	19.605
a_2	0.662	0.266	0.596	0.594	0.419	0.441
Energía de Fractura	1.29	1.5	1.94	1.7	1.9	2

Tabla 6: Parámetros Ley tracción – separación para Hormigón con Fibra C.



Gráfica 48: Apertura máxima de grieta – Cantidad de fibra. Fibra C.

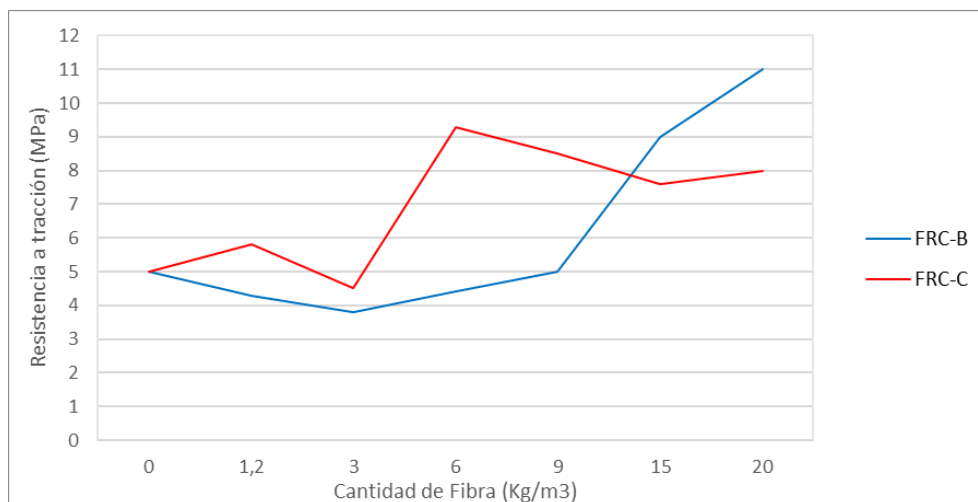


Gráfica 49: Resistencia a tracción Energía de Fractura – Cantidad de fibra. Fibra B.

5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se analizan y discuten los resultados que se han obtenido a lo largo de este trabajo. Se estudia influencia de las fibras en el hormigón y se compara como afecta el tipo de fibra, así como la cantidad de esta añadida a la matriz de hormigón. Este análisis proporcionará una comprensión detallada del impacto de las fibras de carbono en el comportamiento del material. Como se ha expuesto anteriormente, a la hora de ajustar las curvas Carga-CMOD en ABAQUS, se han modificado propiedades como resistencia a tracción, módulo de elasticidad y parámetros que determinan la evolución del daño. Además, se han estudiado los parámetros que definen la ley Cohesiva del material, como es la energía de fractura y el desplazamiento máximo de la grieta.

5.1 Resistencia a tracción



Gráfica 50: Comparativa Resistencia a tracción – Cantidad de Fibra.

En la Gráfica 50 se muestran los resultados de resistencia a la tracción obtenidos para ambos tipos de fibras. A partir de los resultados se observa que, cuando se añaden 1,2 kg/m³ de fibras hay un incremento en la resistencia a tracción del FRC-C del 34% con respecto al FRC-B.

Para 3 kg/m³, no se muestra un aumento en la resistencia a tracción para ninguno de los dos tipos de fibras. En cambio para 6 kg/m³, de nuevo se tiene un aumento de la resistencia a tracción, y de nuevo el valor para la fibra C es notablemente mayor que para el tipo B.

Para 9 kg/m³, es destacable que para la fibra C se observa un descenso de la resistencia a tracción, no obstante, continúa siendo mayor que para el caso de la fibra B, a pesar de que la resistencia a tracción ha mejorado con respecto a la que se tenía con 6 kg/m³ para este tipo de fibra.

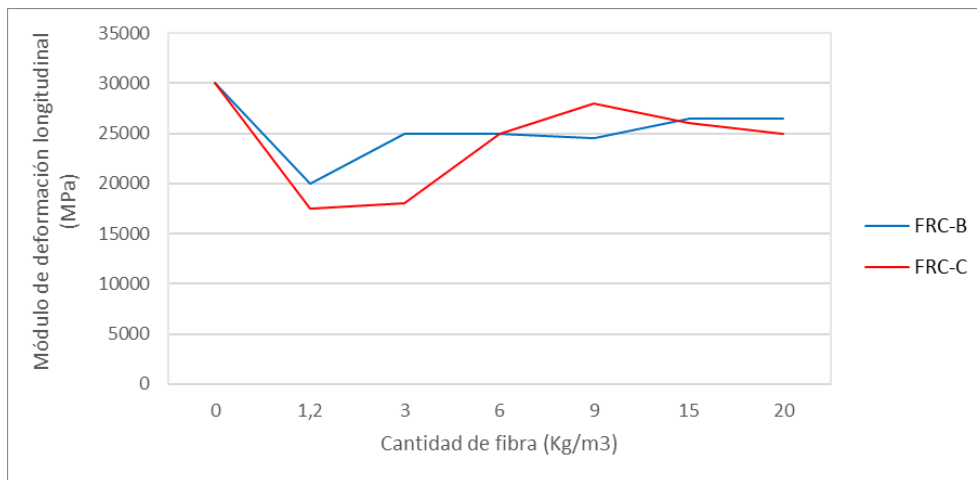
Lo más notable para el caso de 15 kg/m³ de fibra es que el FRC-B, por primera vez, tiene una resistencia a tracción un 18% mayor que el FRC-C.

Finalmente, para 20 kg/m³ se produce un ascenso bastante importante de la resistencia a tracción del FRC-B hasta obtener su máximo, 11 MPa, estando por encima de nuevo del valor para el FRC-C, 8 MPa.

A lo largo de todo el análisis se puede apreciar como los valores de la resistencia a tracción para el FRC-C están por encima de los obtenidos para el FRC-B excepto para los valores más elevados de cantidad de fibra. Se recuerda que las fibras de Tipo C tienen una longitud el doble de larga que las del Tipo B, por lo tanto, ese mejor comportamiento del FRC-C para menor cantidad de fibras se demuestra que las fibras más largas actúan como barreras más efectivas al requerir una menor cantidad de fibra para lograr su función. Por otro lado, en el caso de fibras más cortas, se hace necesario incrementar su cantidad para obtener mejoras significativas en la resistencia a tracción del material [3].

Estos resultados destacan el efecto positivo del refuerzo con fibras en la capacidad del hormigón para resistir esfuerzos de tracción. Sin embargo, se debe tener en cuenta la optimización de la cantidad de fibra, ya que un exceso podría llevar a cambios en otras propiedades mecánicas y de comportamiento del material.

5.2 Módulo de deformación longitudinal

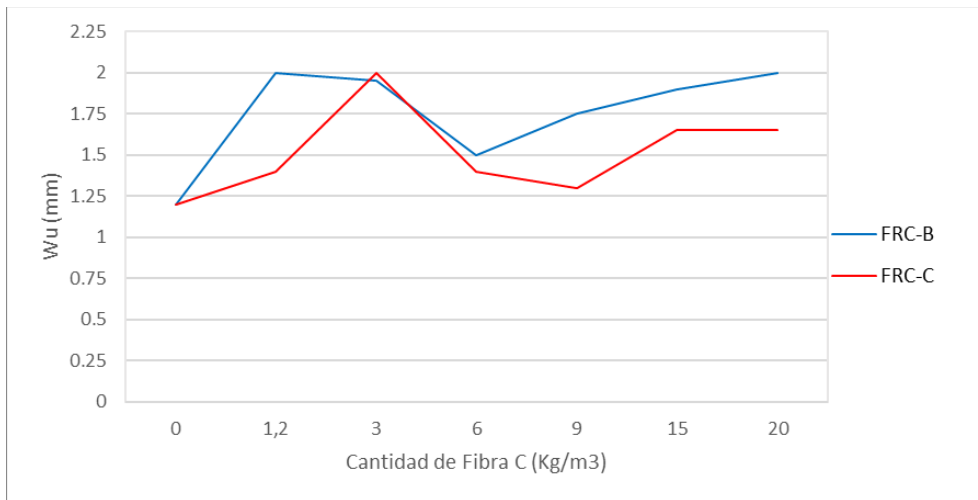


Gráfica 51: Comparativa Módulo de Elasticidad – Cantidad de Fibra.

En cuanto a los resultados obtenidos del módulo de Young no existe una tendencia clara en su evolución a medida que aumenta la cantidad de fibra (Gráfica 51). Se observa dicho valor disminuye, al añadir 1,2 kg/m³ de fibras para ambos hormigones. Algunas investigaciones afirman que esta propiedad está fundamentalmente influenciada por la existencia de un gran número de poros de tamaños del orden de nanómetros, más que por la existencia de pequeñas cantidades de poros del orden de milímetros [3].

Para 3 kg/m³ los dos hormigones tienen un ascenso en el valor del Módulo de elasticidad siendo el de la fibra B un 38% mayor el del FRC-B. Para cantidades de fibra entre 6 y 9 kg/m³ el FRC-B no se ve afectado, en cambio se muestra un incremento del módulo de elasticidad para el FRC-C, siendo esta la única ocasión en la que el FRC-C supera al FRC-B con respecto a su valor de módulo de Young.

5.3 Apertura máxima de grieta

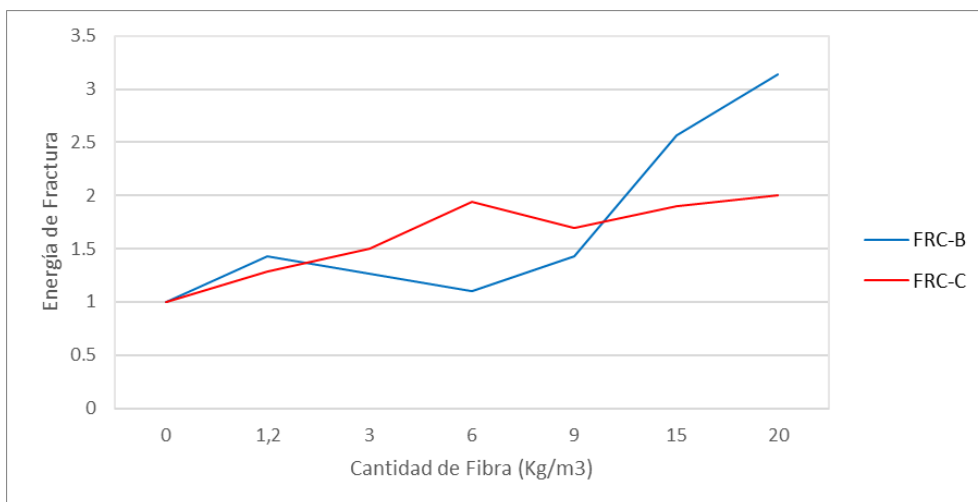


Gráfica 52: Comparativa Apertura máxima de grieta – Cantidad de Fibra.

Con respecto a la apertura máxima de la grieta permitida (Gráfica 52) se observa un notable ascenso de dicho valor para 1,2 kg/m³ para ambos hormigones, teniendo el FRC-B un valor un 45% mayor que el FRC-C.

Para 3 kg/m³ ambos hormigones tienen el mismo valor de apertura máxima de grieta y para 6 kg/m³ ambos sufren un descenso de dicho valor. Para mayores cantidades, a partir de 9 kg/m³ ambos materiales tienen un ascenso, estando de nuevo el FRC-B por encima del FRC-C.

5.4 Energía de Fractura



Gráfica 53: Comparativa Energía de Fractura – Cantidad de Fibra.

Al estudiar cómo evoluciona la energía de fractura en función de la cantidad de añadida (Gráfica 53) se puede ver como aumenta dicho valor para ambos hormigones con 1,2 kg/m³ de fibra.

Para 3 kg/m³ el FRC-C sigue aumentando su valor hasta 6 kg/m³, en cambio el FRC-B tiene un descenso ese tramo de cantidad de fibras, de 3 a 6 kg/m³.

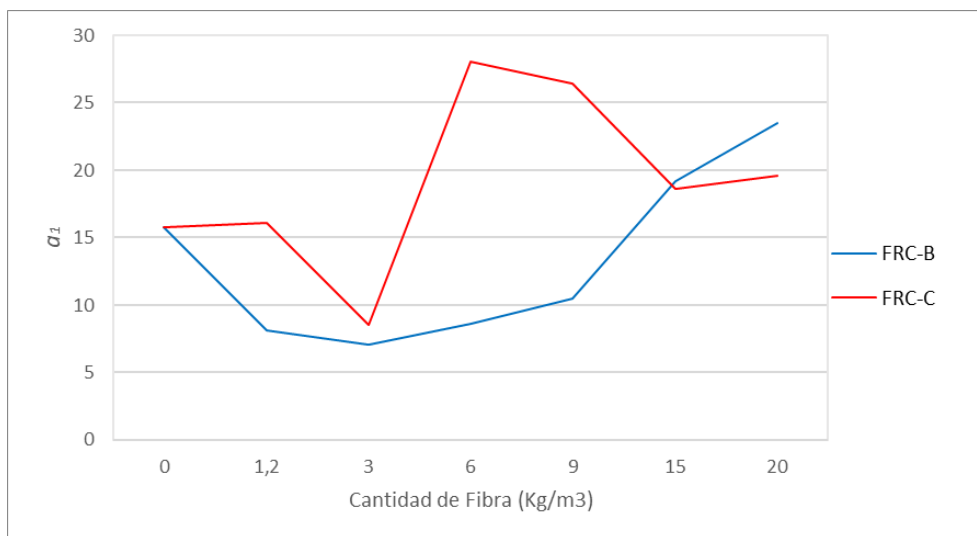
A partir de 9 kg/m³ ambos tienen una tendencia creciente, siendo la pendiente del FRC-B bastante mayor, obteniendo finalmente con 20 kg/m³ un valor de la energía de fractura para el FRC-B un 57% mayor que para el FRC-C.

5.5 Microfisuración del hormigón

Para analizar la microfisuración en el hormigón reforzado se analizan los valores de la pendiente de la primera rama del diagrama bilineal equivalente a la Ley Cohesiva exponencial, a_1 , ya que el valor de esta pendiente está relacionado con la microfisuración del hormigón. El concepto de microfisuración hace referencia a la formación de pequeñas grietas a nivel microscópico en la matriz del material, estas grietas pueden desarrollarse debido a diversas razones.

La primera rama de la Ley Cohesiva del hormigón está relacionada con la rigidez inicial del material en el rango elástico, sin embargo, la microfisuración es un fenómeno complejo que puede estar influenciado por muchos factores adicionales, por lo tanto, un mayor valor de a_1 puede sugerir una mayor resistencia a la microfisuración del hormigón, pero no guarda una relación directa. Para analizar y comprender completamente cómo evoluciona la microfisuración del hormigón se requiere un análisis integral de todos los factores relacionados con ella.

Partiendo de esa base, se va a analizar el valor de a_1 para obtener una idea aproximada de cómo se comportan los hormigones reforzados con las fibras de carbono analizadas en este trabajo.



Gráfica 54: Comparativa pendiente a_1 – Cantidad de Fibra.

Analizando la gráfica se observa una evolución creciente de la pendiente para el FRC-B, tal y como se esperaba, ya que esto significaría que con el aumento de la cantidad de fibras mejora la microfisuración en el hormigón reforzado. Sin embargo, para el hormigón reforzado con el tipo de fibra C, se tiene de nuevo un descenso inesperado para 3 kg/m³ de fibra para luego aumentar mucho para 6 kg/m³ de fibra.

Lo más destacable que se observa en la evolución de los valores de la pendiente es que los valores para el FRC-C están por encima de los de el FRC-B excepto para los valores mayores de la cantidad de fibra, de igual manera que ocurría en el análisis de la resistencia a tracción.

6 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

El objetivo de este trabajo es estudiar las propiedades de un hormigón de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras de carbono fabricado con distintos tipos y cantidades de fibra. Se analiza cómo afecta la introducción de estas al material, siendo las fibras de carbono un tipo de fibras innovadoras de las que no se tiene mucha información.

A lo largo del trabajo se ha expuesto como afecta la adición de fibras a cada una de las propiedades del hormigón. Entre los hallazgos más significativos, destaca un valor mínimo de la resistencia a tracción en el hormigón reforzado con fibra C para 3 kg/m^3 de fibra (Gráfica 30), y en el valor también mínimo de la pendiente de la primera rama de la Ley Cohesiva Bilineal para este mismo tipo y cantidad de fibra (Gráfica 54). Esto es algo imprevisto, ya que lo que se espera es que con la adición de fibras las propiedades del hormigón mejoren, tal y como se ve en el hormigón FRC-B, donde se observa una curva con tendencia creciente a medida que aumenta la cantidad de fibras (Gráfica 27). Este trabajo tiene como datos de partida resultados experimentales de una investigación en marcha, por lo tanto, este hallazgo inesperado plantea al equipo de investigación la necesidad de repetir los ensayos para esta cantidad y tipo de fibra.

Además, se observa como el FRC-C tiene en la mayoría de los casos valores de la resistencia a tracción mayores que el FRC-B (Gráfica 50). Recordando que las fibras de Tipo B tienen 3 mm de longitud mientras que las de Tipo C tienen 6 mm, puede justificarse este hito concluyendo que las fibras más largas tienen la capacidad de desarrollar una mayor resistencia, con mayores deformaciones, asociada a la mayor adherencia de estas fibras, mientras que en el hormigón con microfibras la menor adherencia hace que la resistencia sea bastante menor [2].

Por otro lado, se observa una tendencia creciente en la apertura máxima de grieta para ambos hormigones reforzados (Gráfica 52). Al aumentar esta propiedad con la adición de fibras se puede deducir que dichas fibras mejoran la capacidad de absorción de energía del material y su comportamiento en tracción, lo que puede traducirse en una mayor apertura de grieta antes de la fractura completa. Esto también justifica la tendencia creciente de la energía de fractura (Gráfica 53). Tal y como se mencionó anteriormente, la energía de fractura mide cantidad de energía necesaria para la creación de una grieta. Al aumentar dicho valor, mejora el comportamiento del hormigón, por lo tanto, se puede decir que la adición de fibras favorece al hormigón desde este punto de vista. Se observa algún descenso puntual en la gráfica debido probablemente a que el modelo no capte muy bien el comportamiento del hormigón en ese caso, aun así, la tendencia de la gráfica es creciente tal y como se esperaba.

Se puede concluir por lo tanto que, la adición de fibras de carbono a la matriz de hormigón mejora sus propiedades. Teniendo en cuenta a una proporción y tipo de fibras adecuada se consigue un material con propiedades inigualables a las que se obtienen con otro tipo de materiales.

6.2 Nuevas líneas de investigación

Los desarrollos futuros en esta línea de investigación presentan perspectivas muy interesantes para una mayor comprensión y aplicación de los resultados obtenidos. Como se ha mencionado anteriormente, una recomendación clave es la repetición del ensayo para ciertos hormigones donde se ha obtenido un resultado inesperado. Esto permitiría un análisis más profundo y una validación adicional de los hallazgos previos.

Además, la investigación sobre este tema podría continuar analizando los demás tipos de fibras que se analizan en el estudio experimental previo a este trabajo. Sería interesante llevar a cabo un análisis que abarque una gama más amplia de tipos de fibras, para así profundizar más en la comprensión de las propiedades del hormigón reforzado con fibras de carbono.

Una nueva línea de investigación que mejoraría notablemente el análisis podría ser la integración de modelos numéricos respaldados por inteligencia artificial. Mediante esta metodología, sería posible ajustar automáticamente los parámetros del hormigón a través de iteraciones continuas, lo que obtendría resultados más exactos en las propiedades de los hormigones estudiados.

Otro área de investigación a plantear es el estudio de hormigones reforzados con fibras de carbono en condiciones ambientales extremas, como entornos altamente corrosivos. La resistencia a la corrosión es un factor importante en la durabilidad de las estructuras y un análisis de cómo las fibras de carbono interactúan con los agentes corrosivos en estos entornos, así como su influencia en la durabilidad y vida útil del hormigón, sería muy interesante.

En conjunto, estas nuevas líneas de investigación no solo enriquecerían nuestra comprensión del fenómeno estudiado, sino que también podrían llevar a la creación de hormigones reforzados con fibras altamente eficientes y adaptados para aplicaciones específicas, impulsando así el avance continuo en este campo.

REFERENCIAS

- [1] H. Bulté Cifuentes y F. Medina Encina, *Mecánica de la Fractura Aplicada al Hormigón*, Sevilla: Universidad de Sevilla. Secretariado de publicaciones, 2013.
- [2] A. Martínez de la Concha, J. D. Ríos y H. Cifuentes, «Numerical Study of the Shear Behavior of Ultra-High-Performance Concrete Beams,» *Hormigón y Acero*, 2023.
- [3] J. D. Ríos Jimenez, C. Leiva Fernández y H. Cifuentes Bulté, «Analysis of the mechanical and fracture behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with multiscale carbon fibers».
- [4] J. D. Ríos, C. Leiva, M. Ariza, S. Steil y H. Cifuentes, «Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography,» *Materials and Design* 165, 2019.
- [5] A. DSimulia, *Abaqus Analysis User's Manual*.
- [6] J. D. Ríos, H. Cifuentes y C. Leiva, «Effect of polypropylene fibers on the fracture behavior of heated ultra-high performance concrete,» *International Journal of fracture* 223, Diciembre 2019.
- [7] H. Cifuentes, «Effect of mix design on the size-independent fracture energy of normal- and high-strength self-compacting concrete,» *Materiales de Construcción. Vol 68.*, Enero-Marzo 2018.