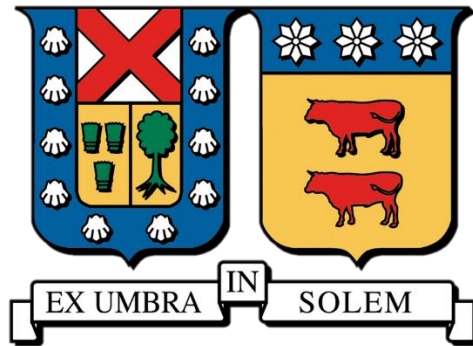


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAÍSO – CHILE



DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS RESIDUALES DE HORMIGONES  
REFORZADOS CON FIBRAS SINTÉTICAS SOMETIDOS A ESFUERZOS DE TRACCIÓN  
DIAGONAL

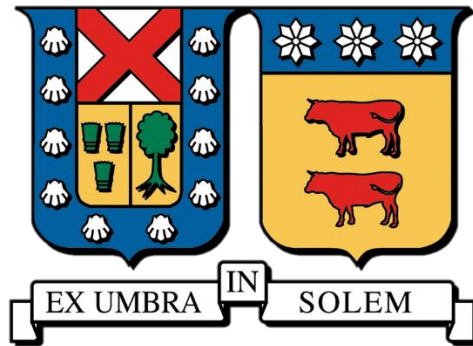
DANILO PATRICIO ANDRADE GONZÁLEZ

Memoria para optar al Título de  
Constructor Civil

Profesor Guía  
Sergio Carmona Malatesta

Abril 2021

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAÍSO – CHILE



DETERMINACIÓN DE LAS RESISTENCIAS RESIDUALES DE HORMIGONES  
REFORZADOS CON FIBRAS SINTÉTICAS SOMETIDOS A ESFUERZOS DE TRACCIÓN  
DIAGONAL

Memoria de titulación presentado por  
DANILO PATRICIO ANDRADE GONZÁLEZ

Como requisito parcial para optar al título de  
Constructor Civil

Profesor Guía  
Sergio Carmona Malatesta

Abril 2021

## AGRADECIMIENTOS

---

A veces subestimamos ciertos aspectos de la vida y damos por hecho otras cosas. Agradezco a mis amigos, compañeros y excompañeros que siempre están ahí, sin importar, dando aliento.

Mencionar a mis compañeros de investigación, Mauricio Celedón y Maciel Garrido por aquellas risas que no faltaron durante el proceso.

Agradecer con especial cariño a Don Tomás, por su constante preocupación.

Al profesor guía, el Dr. Ingeniero Sergio Carmona Malatesta. no solo quiero agradecerle por su cooperación, sino también reconocer su paciencia y empatía, más aún en estos tiempos.

Finalmente, agradecer a mi familia por darme el espacio, tiempo y todo lo necesario para cumplir con esto.

# DEDICATORIA

---

*Para mis padres, perdón por tanta terquedad y  
soberbia.*

*También para ti, abuelita Carmen, yo sé que  
serás la más feliz de este logro.*

## RESUMEN

---

La presente memoria tiene por finalidad principal caracterizar hormigones con tres tipos de fibras que son parte del grupo de fibras sintéticas. Por lo que el foco es estudiar el comportamiento de vigas de hormigón elaboradas con distintas cuantías, como también distintos tipos de fibras. Todo con el fin de caracterizar el aporte de estas al hormigón cuando este es sometido a tracción diagonal. Para efectos de lograr esto, se elaboran y ensayan probetas (vigas) con las siguientes cuantías: 0, 2, 4, 6 y 8 [kg/m<sup>3</sup>] para cada fibra sintética, siendo estas BC-48, BC-50 y BC-54. Estas vigas poseen una entalla artificial de 50 [mm], desplazada 100 [mm] desde el centro de la luz de apoyo y se controla la velocidad de deformación, es decir, la velocidad con la que se abre la grieta. Se pretende determinar tenacidad y evaluar el comportamiento del material ante las sollicitaciones de tracción. Los resultados son analizados y comparados entre las diferentes cuantías y entre las diferentes fibras.

Se determinó que, a mayor cuantía de fibra, mayor es la tenacidad de la mezcla ante cargas de tracción diagonal o corte, puesto que el refuerzo de fibra permite controlar la apertura de grieta generada por la sollicitación. No se observan grandes diferencias entre fibras, a excepción de la BarChip54, diferencias que se asocian posiblemente al tamaño. Mientras que, entre dosis, todas las fibras presentan mejor comportamiento para dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>]. Al analizar las resistencias residuales y tensión de cizalle en la carga máxima de ensayo, se determinó que el comportamiento al corte o tracción diagonal del material aumenta, mostrando un aporte previo al agrietamiento. Además, post agrietamiento se genera un aumento en tenacidad y resistencia a mayores dosis de fibra, lo que permite concluir que la cuantía de fibra influye de forma directa a las características mecánicas del hormigón reforzado, generando mayor ductilidad y resistencia ante las sollicitaciones estudiadas en la presente investigación de memoria.

## ABSTRACTS

---

The main purpose of this dissertation is to characterize fiber reinforced concretes that contain three different kind of these, all of them synthetic. Thus, the focus is to study the behavior of concrete beams made with different amounts of such fibers. All of this aims to characterize the contribution of these to the concrete when it is subjected to diagonal tension. In order to achieve this, specimens (beams) are elaborated and tested with the following amounts: 0, 2, 4, 6 and 8 [kg / m<sup>3</sup>] for each one of the synthetic fibers, these being BC-48, BC-R50 and BC- 54. The beams have an artificial notch of 50 [mm] with an offset of 100 [mm] from the center of the span. Besides, the rate of deformation is controlled, i.e., the speed with which the crack opens. It is pretended to determine toughness and evaluate the behavior of the material to diagonal tensile. The results are analyzed and compared against each other according to the different amounts and types of fibers.

It was concluded that, the higher the amount of fiber, the greater the toughness of the fiber cementitious matrix under diagonal or shear tensile loads, since the fiber reinforcement allows controlling the crack opening generated by the stress. No great differences were observed among fibers, except for BarChip54, differences that are possibly associated with their size. Meanwhile between doses, all fibers show better performance for doses of 8 [kg / m<sup>3</sup>]. When analyzing the residual strength and shear stress at the maximum load, it was determined that the shear or diagonal tensile behavior of the material increases, showing a contribution prior to cracking. In addition, in the post-cracking an increase is generated in toughness and shear resistance to higher doses of fiber, which allows to conclude that the amount of fiber directly influences the mechanical characteristics of fiber reinforced concrete, generating greater ductility and resistance to stresses studied in the present dissertation.

# ÍNDICE

---

Agradecimientos .....	2
Dedicatoria .....	3
Resumen .....	4
Abstracts .....	5
Índice de figuras .....	8
Índice de gráficos .....	8
Índice de tablas .....	9
Índice de ilustraciones .....	10
1 Introducción .....	11
1.1 Antecedentes .....	11
1.2 Objetivos .....	12
1.2.1 General .....	12
1.2.2 Específicos .....	12
1.3 Metodología general .....	12
2 Marco Teórico .....	13
2.1 Hormigón Reforzado con Fibra (HRF) .....	13
2.2 Fibras sintéticas BarChip .....	14
2.2.1 BarChip 48 .....	14
2.2.2 BarChip R50 .....	14
2.2.3 BarChip 54 .....	14
2.3 La Fibra en la matriz .....	14
2.4 Resistencia a tracción diagonal en vigas .....	17
2.5 Determinación de la resistencia al corte del HRF .....	19
3 Investigación – Plan de trabajo .....	21
4 Campaña experimental .....	22
4.1 Materiales .....	22
4.2 Dosificaciones .....	22
4.3 Determinación de diseño y tipo de viga a ensayar, y su justificación .....	22
4.4 Ensayos para caracterizar el HRF .....	23
4.4.1 Ensayo de compresión .....	23

4.4.2	Ensayo de hendimiento .....	25
4.4.3	Ensayo de tracción diagonal propuesto .....	26
5	Resultados y análisis de datos .....	29
5.1	Resultados ensayo de compresión.....	29
5.2	Resultados ensayo de hendimiento .....	31
5.3	Resultados ensayo a tracción diagonal (propuesto) .....	32
5.3.1	Vigas de Hormigón en masa .....	32
5.3.2	Vigas con fibras BarChip 48 .....	33
5.3.3	Vigas con fibras BarChip R50.....	37
5.3.4	Vigas con fibras Barchip 54 .....	41
5.4	Análisis resultados ensayo a tracción propuesto .....	45
5.4.1	Comparación distintas dosis de BC 48.....	45
5.4.2	Comparación distintas dosis de BC R50 .....	47
5.4.3	Comparación distintas dosis de BC 54.....	49
5.4.4	Comparación distintas fibras en dosis iguales.....	51
5.4.5	De los ángulos medidos y su dispersión.....	53
5.4.6	Comparación resistencia a la tracción medida versus tracción por hendimiento .....	54
6	Conclusiones .....	55
7	Anexos.....	58
7.1	Curvas individuales agrupadas.....	58
7.2	Comparaciones individuales .....	64
7.3	Vigas fallidas.....	70
7.4	Datos individuales.....	71
7.5	Imágenes .....	75
8	Bibliografía y referencias .....	77
8.1	Libros .....	77
8.2	Artículos y publicaciones.....	77
8.3	Tesis y memorias.....	77
8.4	Normas .....	78
8.5	Web y otros .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 Fibras sintéticas.....	14
Figura 2.2 Fases de la fibra (Parrales, 2020).....	15
Figura 2.3 Gráfico esfuerzo-deformación para vigas de hormigón, con y sin refuerzo, sometidas a flexión (Neville & Brooks, 1987). ....	16
Figura 2.4 Gráfico esfuerzo-deformación para cilindros, con y sin refuerzo, sometidos a compresión (Neville & Brooks, 1987).....	16
Figura 2.5 Gráfico esfuerzo-deformación para vigas con distintas dosis de fibra. ....	17
Figura 2.6 Análisis de la viga en dos secciones (Pezeshk, 2014).....	18
Figura 2.7 Distribución de esfuerzos (Pezeshk, 2014).....	18
Figura 2.8 Trayectorias de corte (Pezeshk, 2014).....	19
Figura 2.9 Probetas tipo Z, para ensayos de corte (Barr, 1987). ....	19
Figura 2.10 Otras probetas utilizadas para determinar comportamiento del hormigón frente a esfuerzos de corte (Shah et al., 1995).....	20
Figura 2.11 Configuración del ensayo propuesto por la recomendación japonesa SF-6. ....	20
Figura 4.1 Rectificador Hi-Kenma.....	24
Figura 4.2 Equipo Controls C35Z00.....	24
Figura 4.3 Posición del cilindro y las tablillas. ....	25
Figura 4.4 Formato de entrega de resultados. ....	26
Figura 4.5 Disposición de la viga a ensayar.....	26
Figura 4.6 Posición placa y LDVT.....	27
Figura 4.7 Esquema de corrección CMOD. Donde $h=100$ [mm], $h'=50$ [mm], $h''=150$ [mm], $h'''=171$ [mm] e $y=21$ [mm]. ....	28

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico 5.1 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" de las vigas de hormigón en masa.....	32
Gráfico 5.2 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 48-2.....	33
Gráfico 5.3 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 48-4.....	34
Gráfico 5.4 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 48-6.....	35
Gráfico 5.5 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 48-8.....	36
Gráfico 5.6 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 50-2.....	37
Gráfico 5.7 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 50-4.....	38
Gráfico 5.8 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 50-6.....	39
Gráfico 5.9 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 50-8.....	40
Gráfico 5.10 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 54-2.....	41
Gráfico 5.11 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 54-4.....	42
Gráfico 5.12 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 54-6.....	43
Gráfico 5.13 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" para vigas BC 54-8.....	44
Gráfico 5.14 Comparación entre dosis de BC 48.....	45
Gráfico 5.15 Comparación entre dosis de BC 50.....	47
Gráfico 5.16 Comparación entre dosis de BC 54.....	49

Gráfico 5.17 Comparación dosis de 2 kg/m <sup>3</sup> para las distintas fibras .....	51
Gráfico 5.18 Comparación dosis de 4 kg/m <sup>3</sup> para las distintas fibras .....	51
Gráfico 5.19 Comparación dosis de 6 kg/m <sup>3</sup> para las distintas fibras .....	52
Gráfico 5.20 Comparación dosis de 8 kg/m <sup>3</sup> para las distintas fibras .....	52
Gráfico 7.1 Curvas esf.- def- de las distintas vigas de Ho. en masa .....	58
Gráfico 7.2 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-2 .....	58
Gráfico 7.3 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-4 .....	59
Gráfico 7.4 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-6 .....	59
Gráfico 7.5 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-8 .....	60
Gráfico 7.6 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-2 .....	60
Gráfico 7.7 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-4 .....	61
Gráfico 7.8 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-6 .....	61
Gráfico 7.9 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-8 .....	62
Gráfico 7.10 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-2 .....	62
Gráfico 7.11 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-4 .....	63
Gráfico 7.12 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-6 .....	63
Gráfico 7.13 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-8 .....	64
Gráfico 7.14 Comparación BC 48-2 versus Ho .....	64
Gráfico 7.15 Comparación BC 48-4 versus Ho .....	65
Gráfico 7.16 Comparación BC 48-6 versus Ho .....	65
Gráfico 7.17 Comparación BC 48-8 versus Ho .....	66
Gráfico 7.18 Comparación BC 50-2 versus Ho .....	66
Gráfico 7.19 Comparación BC 50-4 versus Ho .....	67
Gráfico 7.20 Comparación BC 50-6 versus Ho .....	67
Gráfico 7.21 Comparación BC 50-8 versus Ho .....	68
Gráfico 7.22 Comparación BC 54-2 versus Ho .....	68
Gráfico 7.23 Comparación BC 54-4 versus Ho .....	69
Gráfico 7.24 Comparación BC 54-6 versus Ho .....	69
Gráfico 7.25 Comparación BC 54-8 versus Ho .....	70
Gráfico 7.26 Curva esfuerzo-deformación viga entalla 2.5 mm .....	70
Gráfico 7.27 Curva esfuerzo-deformación viga con FC .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1 Características fibras BarChip (BarChip, 2019). .....	14
Tabla 4.1 Dosificaciones a utilizar para HRFs.....	22
Tabla 5.1 Resultados ensayo de compresión para hormigones en masa y con fibra BC 48.....	29
Tabla 5.2 Resultados ensayo de compresión para hormigones con fibra BC R50.....	30
Tabla 5.3 Resultados ensayo de compresión para hormigones con fibra BC 54.....	30
Tabla 5.4 Resultados ensayo de hendimiento para todas las probetas .....	31
Tabla 5.5 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas de hormigón en masa	32
Tabla 5.6 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para hormigones en masa .....	32
Tabla 5.7 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-2 .....	33
Tabla 5.8 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-2.....	33
Tabla 5.9 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-4 .....	34

Tabla 5.10 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-4 .....	34
Tabla 5.11 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-6.....	35
Tabla 5.12 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-6.....	35
Tabla 5.13 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-8.....	36
Tabla 5.14 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-8.....	36
Tabla 5.15 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-2.....	37
Tabla 5.16 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-2.....	37
Tabla 5.17 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-4.....	38
Tabla 5.18 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-4.....	38
Tabla 5.19 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-6.....	39
Tabla 5.20 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-6.....	39
Tabla 5.21 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-8.....	40
Tabla 5.22 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-8.....	40
Tabla 5.23 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-2.....	41
Tabla 5.24 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-2.....	41
Tabla 5.25 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-4.....	42
Tabla 5.26 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-4.....	42
Tabla 5.27 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-6.....	43
Tabla 5.28 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-6.....	43
Tabla 5.29 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-8.....	44
Tabla 5.30 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-8.....	44
Tabla 5.31 Comparación de CMOD de las distintas dosis de BC 48.....	46
Tabla 5.32 Resistencia máxima al cizalle de vigas BC 48.....	46
Tabla 5.33 Resistencias al corte en distintos puntos post-agrietamiento de vigas BC 48.....	46
Tabla 5.34 Comparación de CMOD de las distintas dosis de BC 50.....	48
Tabla 5.35 Resistencia máxima al cizalle de vigas BC 50.....	48
Tabla 5.36 Resistencias al corte en distintos puntos post-agrietamiento de vigas BC 50.....	48
Tabla 5.37 Comparación de CMOD de las distintas dosis de BC 54.....	50
Tabla 5.38 Resistencia máxima al cizalle de vigas BC 54.....	50
Tabla 5.39 Resistencias al corte en distintos puntos post-agrietamiento de vigas BC 54.....	50
Tabla 5.40 Comparación cruzada de cargas máximas .....	53
Tabla 5.41 Ángulos de grietas.....	53
Tabla 5.42 Resumen comparativo resistencias a la tracción .....	54
Tabla 7.1 Ángulos individuales de las vigas .....	71
Tabla 7.2 Valores individuales del ensayo de compresión .....	73
Tabla 7.3 Valores individuales del ensayo de hendimiento .....	74

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 7.1 Imágenes referenciales de medición de ángulo.....	75
Ilustración 7.2 Posicionamiento ensayo compresión .....	75
Ilustración 7.3 Configuración ensayo propuesto.....	75
Ilustración 7.4 Posicionamiento LDVT y placa de vidrio.....	76
Ilustración 7.5 Grieta al terminar ensayo .....	76

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 ANTECEDENTES

El hormigón es un material compuesto que se obtiene de la mezcla, principalmente, de cemento, agua y agregados pétreos, obteniendo un material homogéneo. Este material tiene un muy buen comportamiento frente a los esfuerzos de compresión, pero al ser sometido a flexión no solo está presente la compresión, sino que además se presentan esfuerzos de tracción y corte, y es aquí donde el hormigón por sí solo no trabaja bien. Para mejorar este punto, tradicionalmente el método más efectivo ha sido agregar una armadura de acero, sobre todo en la zona traccionada, la cual se dispone de tal manera que lo ayude a mejorar su resistencia en tracción y soportar los esfuerzos de corte, además de permitir que el elemento falle, pero no colapse; llamando al resultado de este método “hormigón armado”. Junto con las armaduras de acero, también se suelen utilizar cables de pre y post tensado para suplir las ya mencionadas falencias del hormigón, siendo los “hormigones pretensados” elementos prefabricados y los “hormigones postensados” elementos hechos in situ bajo esta metodología. Se puede incluir dentro de estos métodos el uso de fibras, pero para ello es necesario el estudio de estas dentro de la matriz de hormigón para entender su aporte, pasando a llamarse “hormigones reforzados con fibra” al resultado de este. “Según el ACI 116R-00, el hormigón reforzado con fibras (HRF), es una combinación de cemento hidráulico, agua, áridos finos y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas aleatoriamente orientadas” (Cuenca, 2008, p. 3).

Existen variedades de fibras y, por tanto, variedades de clasificaciones, sin embargo, lo usual es usar la clasificación dada por la norma ASTM C 1116-1103 (ASTM, 2011). Las fibras disponibles para reforzar el hormigón son de acero, vidrio y polímeros orgánicos (fibras sintéticas). Naturalmente fibras de asbesto y vegetales también son usadas como refuerzo. En la mayoría de los casos la matriz de hormigón corresponde mezclas bien formuladas para una aplicación concreta. Por lo general el largo y el diámetro de las fibras utilizadas para el HRF no exceden los 76 [mm] y 1 [mm], respectivamente (ACI Committee 544, 2002).

“El uso de fibras para el reforzamiento de materiales de construcción frágiles no es un concepto nuevo. En las antiguas civilizaciones de Asia Occidental, África y Sudamérica, fibras de paja eran frecuentemente utilizadas para reforzar los bloques de adobe” (Slater, Moni & Alam, 2011, p. 1). En épocas recientes, se masificó el uso de fibras de asbesto en una matriz cementicia con la invención del proceso Hatschek en 1899. Sin embargo, debido a los riesgos de salud asociados con las fibras de asbesto, es que fueron introducidas distintos tipos de fibras alternativas durante los ‘60s y ‘70 (ACI Committee 544, 2002).

A través de la presente memoria se analizará el comportamiento de vigas de hormigón con una entalla desplazada y reforzadas con fibras de polipropileno. Se inducirá falla por corte o tracción diagonal con el fin de caracterizar las propiedades de los hormigones reforzados con estas fibras, habrá condiciones específicas y controladas y se evaluará la respuesta posterior a la fisuración, donde la fibra otorga el mayor aporte a este material compuesto. Para lograr esto se confeccionaron probetas de igual hormigón de igual, pero diferentes dosis de fibra. Se someterán a ensayos de compresión, hendimiento (tracción indirecta), y tracción diagonal. Este último es un ensayo propuesto en la presente memoria, que toma como referencia investigaciones del área, otros ensayos ya conocidos, una etapa de prueba y el conocimiento de quienes participan. Mientras que los demás ensayos se ejecutan acorde a las normas existentes.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 General

- Determinar y analizar resistencias residuales de hormigones reforzados con distintas cuantías de fibras BarChip 48, BarChip 50 y BarChip 54; y sometidos a tracción diagonal, mediante análisis del comportamiento de vigas confeccionadas con entalle desplazado, para inducir fractura deseada, y bajo un ensayo propuesto.

### 1.2.2 Específicos

- Implementar ensayo para caracterización de la resistencia a la tracción diagonal en vigas de hormigón.
- Estudiar comportamiento de hormigones reforzados con fibra en diferentes cuantías, para ello:
  - Estudiar comportamiento de hormigones sin fibra para determinar como base.
  - Comparar el comportamiento de las vigas con diferentes fibras y las diferentes cuantías entre sí y en respecto a las vigas sin fibras, determinando el desplazamiento (corregido), tenacidad y resistencias residuales frente al cizalle de cada probeta, mediante el uso de transductores (LDVT) que entregan valores en *CMOD* para ser comparados y analizados.
  - Determinar la curva “carga-apertura de fisura” de vigas de hormigón en masa y de hormigón reforzado con fibras sometidas a ensayo de corte diagonal.
  - Cuantificar el incremento provocado por las fibras en las resistencias residuales ante la sollicitación propuesta.
  - Estudiar la dispersión de las grietas.

## 1.3 METODOLOGÍA GENERAL

En primer lugar, se confeccionan probetas de HRF, vigas y cilindros, los que serán puestos a prueba. Estas probetas cuentan con distintas cuantías de fibras sintéticas, como también distintos tipos de fibra.

Una vez ya confeccionadas, se debe proponer un ensayo que permita evaluar el aporte al corte de las fibras estudiadas, este es un ensayo propuesto y no responde a uno ya existente. Las configuraciones y parámetros varían hasta lograr el punto óptimo donde sea vea una eficacia del ensayo propuesto.

Cuando se define un ensayo que logra el objetivo, se planifica y se ensayan todas las vigas. Para ello se debe generar las condiciones de laboratorio y equipos de acuerdo al número de probetas. Son 6 ejemplares para cada cuantía, pero solo se considerará 3 de ellas, y son 4 cuantías diferentes para 3 tipos de fibra (BarChip 48, R50 y 54), además de un lote de 6 vigas sin fibra. También se ensayan las probetas complementarias, es decir, cilindros que son puestos a ensayos de compresión y hendimiento bajo las normas NCh1037 (INN, 1997) y NCh1170 (INN, 1977) respectivamente. Tener presente que todos los ensayos son realizados una vez alcanzada la resistencia necesaria, es decir, posterior a los 28 días en cámara húmeda y fraguado correspondiente.

Finalmente se realizan cálculos y comparaciones que permitan concluir y dar respuesta a los objetivos, es decir, caracterizar el comportamiento y propiedades del hormigón reforzado con las distintas fibras BarChip ante tensiones de corte.

## 2 MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA (HRF)

El hormigón es un material compuesto con altas resistencia para ciertos esfuerzos, mientras que para otros prácticamente carece de toda capacidad, es el caso de los esfuerzos de tracción, donde se refleja la poca tenacidad para resistir cargas que generan estos esfuerzos y lo que se traduciría en fallas, grietas, fracturas e incluso colapso de estructuras. Por ello, este material, para uso estructural, suele y debe acompañarse de refuerzo.

Comúnmente este refuerzo es acero, en formas de barras estriadas que transforman al hormigón, en hormigón reforzado, uno de los materiales predilectos y cuyo uso va cada año en aumento, en el sector público y privado, también en el común de la ciudadanía como muestran datos de la cantidad de permisos, donde cada año los permisos de edificaciones que incluyen hormigón reforzado aumentan. En comparación con otros materiales de construcción, como metales y polímeros, el hormigón es significativamente más quebradizo y presenta una resistencia a la tracción deficiente. Según los valores de tenacidad a la fractura, el acero es al menos 100 veces más resistente al crecimiento de grietas que el hormigón. Por lo tanto, el servicio de hormigón se agrieta fácilmente y este crea rutas de fácil acceso para agentes nocivos (Ragavendra, Praveen y & Dongre, 2017).

Sin embargo, el acero no es el único modo de refuerzo, también lo es la fibra, aunque esta puede ser de acero también. Cuando el refuerzo es fibra en vez de barras de acero (aunque hay casos donde se usan ambos) hablamos de HRF.

Según el ACI116R-00, el HRF es una combinación de cemento hidráulico, agua, áridos finos y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas aleatoriamente orientadas. Las fibras pueden ser naturales o artificiales según su naturaleza y tienen como fin reforzar la masa del cemento incrementando la resistencia a la tracción disminuyendo la fisuración y aumentando la tenacidad mediante la transmisión de esfuerzos a través de la sección fisurada. Por otro lado, la adición de fibras disminuye los efectos de la retracción por fraguado y aumenta la resistencia al impacto y la resistencia a la fatiga (Cuenca, 2008).

La norma ASTM C 1116 describe las fibras como filamentos finos y alargados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de hormigón fresco, mientras que el ACI (ACI, 2013) las define como un material esbelto y alargado, cuyo largo generalmente es al menos 100 veces su diámetro.

La ASTM mencionada, separa las fibras en 4 tipos, de acero, de vidrio, sintéticas y naturales; y algunas las subdivide según su forma en 5 tipos. Para efectos de esta memoria, las fibras a utilizar son fibras sintéticas, cuya forma es recta y plana.

El hormigón tiene a fisurarse y agrietarse por distintos motivos, el HRF se ha presentado como una excelente alternativa para mejorar el comportamiento de estructuras de hormigón donde se requiere un control de formación y propagación de fisuras o en aquellas que estén expuestas a acciones dinámicas (Montardo, 2005).

Los HRF pueden tener finalidades de carácter estructural o no estructural. Según el ACI son de carácter estructural cuando se toma en cuenta su contribución en los cálculos relativos al estado límite último o de servicio, esto ya que la adición de fibras como refuerzo de hormigones puede incrementar muchas de sus propiedades en el rango post – agrietamiento.

## 2.2 FIBRAS SINTÉTICAS BARCHIP

Las fibras BarChip utilizadas son fibras sintéticas de polipropileno, como la mostrada en la Figura 2.1, optimizadas para diferentes tareas. El volumen a utilizar de estas fibras no responde necesariamente al indicado por el fabricante, como tampoco el uso. Pero se puede concluir a partir de la comparación con la ficha técnica. Sus características se muestran en la Tabla 2.1.

### 2.2.1 BarChip 48

Es una fibra sintética estructural de alto rendimiento para refuerzo del concreto, optimizada para pavimentos, pisos industriales y elementos prefabricados.

### 2.2.2 BarChip R50

BarChip R50 es una fibra sintética estructural de alto rendimiento para refuerzo del concreto, ecológica y optimizada para diversas aplicaciones.

### 2.2.3 BarChip 54

BarChip 54 es una fibra sintética estructural de alto rendimiento para refuerzo del concreto, optimizada para el shotcrete.

Tabla 2.1 Características fibras BarChip (BarChip, 2019).

Característica	BarChip 48	BarChip R50	BarChip 54
Clase de fibra	Para uso estructural en hormigón, argamasa y lechada de cemento		
Resistencia alcalina	Excelente		
Anclaje	Relieve continuo		
Módulo de Young [GPa]	12	10	12
Longitud [mm]	48	48	54
Material de base	Polipropileno virgen	Polipropileno	Polipropileno virgen
Dosificación recomendada [kg/m <sup>3</sup> ]	2,5 a 5	4 a 6	3 a 6
Resistencia a la tensión [MPa]	640	610	640



Figura 2.1 Fibras sintéticas.

## 2.3 LA FIBRA EN LA MATRIZ

Durante la primera etapa de sollicitación de un HRF frente a tracción o flexotracción, la capacidad de resistir esfuerzos depende casi solo del hormigón; mientras que una vez que se inician las fisuras, es decir, la carga superó la resistencia a la tracción del hormigón, es cuando son las fibras las encargadas de resistir y, por tanto, quienes absorben las cargas.

Cuando una fisura se propaga, con trayectorias perpendiculares a los esfuerzos de tracción que actúan al interior de la masa de material, surgen una serie de mecanismos que se oponen a su avance, denominándose a este efecto aumento de la tenacidad. El mecanismo más efectivo es el puente de fisura, en este caso la fisura es frenada cuando se encuentra con una partícula relativamente resistente, por ejemplo, un grano de cemento sin hidratar, una pieza de grava o una fibra de acero. Si la carga aumenta, la fisura puede ser forzada a rodear y sobrepasar la partícula que la frena y en ese momento la fisura se puede ramificar. Cuando el obstáculo se quiebra, la energía almacenada en el cuerpo se disipa en la fricción generada por el desprendimiento de las partículas y en la separación de las caras de la fisura (Carmona, 1997).

Finalmente, lo que sucederá será que la deformación irá en aumento, aún cuando la resistencia a esta sea cada vez mayor pudiendo superar incluso la resistencia máxima obtenida por el hormigón. Sin embargo, habrá una pérdida de anclaje en la interfaz fibra-matriz. Es decir, la fibra posiblemente no llegará a la rotura, antes que ello ocurra, se desprenderá y perderá el contacto con el hormigón. Para aumentar la trabazón es que tienen distintas formas y relieves.

Con el fin de evitar diferencias debido a la forma es que se seleccionó fibras relativamente iguales en forma.

El proceso para que las fibras actúen, posterior a que el hormigón llegó a su máxima resistencia, se muestra en la Figura 2.2.

1. Formación de fisuras en la matriz de hormigón.
2. Apertura y deslizamiento entre la fibra y la matriz.
3. Puente de fibra uniendo la fisura.
4. Deslizamiento con fricción, deformación del anclaje y arranque de la fibra.
5. Arranque total de la fibra o ruptura de esta, producto de la tensión.

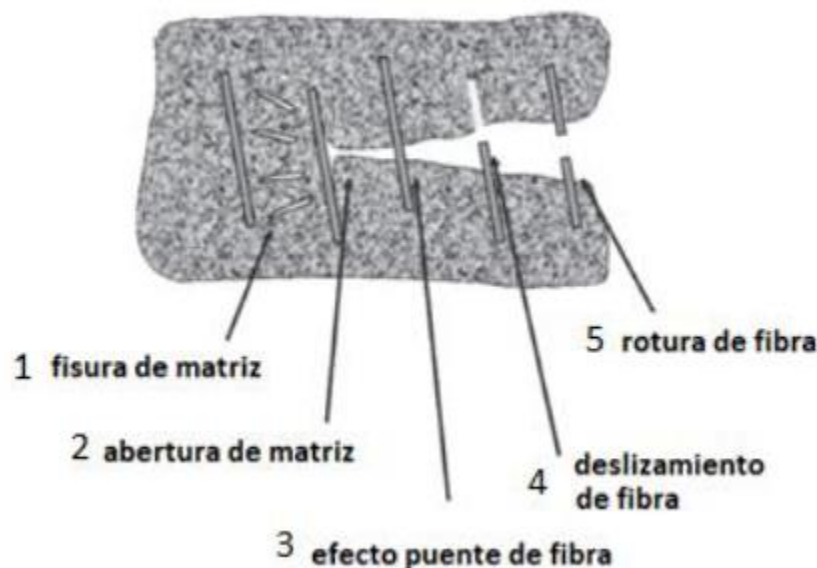


Figura 2.2 Fases de la fibra (Parrales, 2020).

Por tanto, el propósito de reforzar la matriz cementicia con fibras es aumentar la resistencia a la tracción retrasando la apertura y crecimiento de grietas, e incrementar la tenacidad transmitiendo el esfuerzo a través de la sección agrietada, logrando así esa mayor deformación mucho más allá del punto máximo de esfuerzo, lo que no sería posible sin fibra (Neville & Brooks, 1987). El comportamiento típico de esfuerzo-deformación para hormigones reforzados y no reforzados se muestra en las Figuras 2.3 y 2.4.

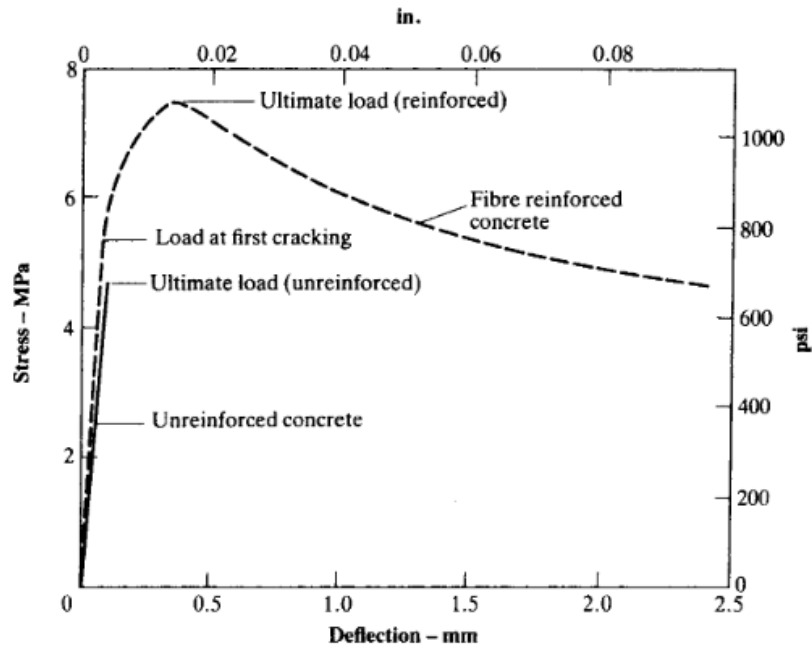


Figura 2.3 Gráfico esfuerzo-deformación para vigas de hormigón, con y sin refuerzo, sometidas a flexión (Neville & Brooks, 1987).

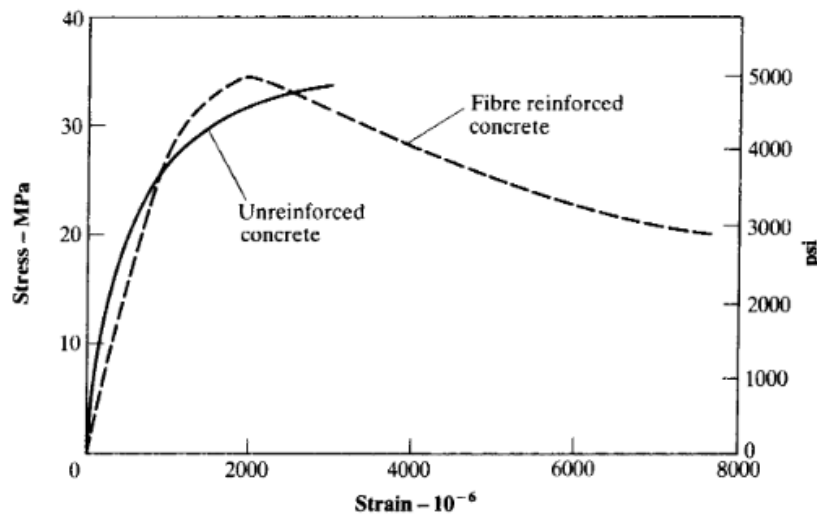


Figura 2.4 Gráfico esfuerzo-deformación para cilindros, con y sin refuerzo, sometidos a compresión (Neville & Brooks, 1987).

Los dos gráficos anteriores muestran el comportamiento esperado de HRF en distintos ensayos. Sin embargo, para el ensayo propuesto el gráfico esperado es el que se muestra en la Figura 2.5. En este se observa la curva para una viga de hormigón sin fibra y la curva para distintos niveles de fibra.

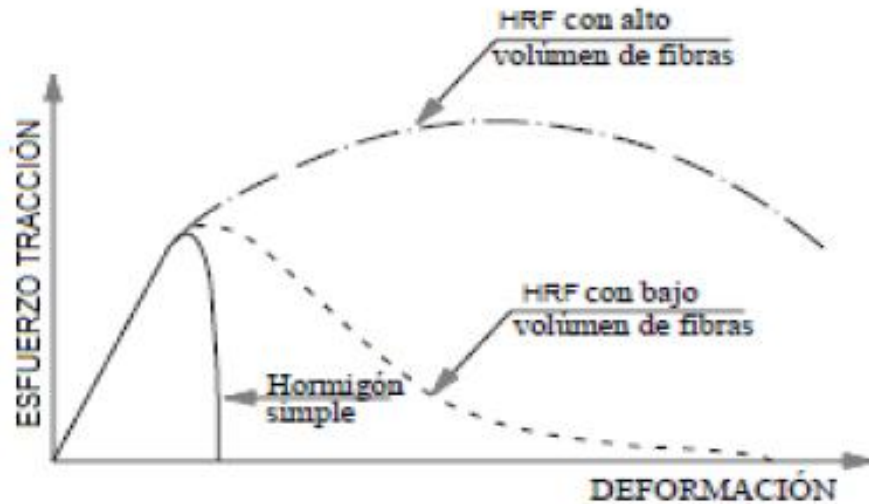


Figura 2.5 Gráfico esfuerzo-deformación para vigas con distintas dosis de fibra.

En la Figura 2.5 se observa todo lo descrito anteriormente. De los ensayos de flexotracción existentes se obtienen resultados como este, con un repunte del esfuerzo una vez la fibra comienza a actuar y un aumento significativo de la tenacidad.

La cantidad de fibras que se agregan a la matriz cementicia usualmente se encuentra en el rango del 1-5 % del volumen de la mezcla. Se suele agregar algún aditivo que permita trabajar mejor debido a que entre menor el diámetro de la fibra, mayor cantidad de estas entra por unidad de volumen.

Además, es necesario que las fibras se repartan lo más uniformemente en la mezcla, evitando que se aglomeren, puesto que la concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades en los materiales compuestos por fibras (Carmona y Maripanguí, 2007).

## 2.4 RESISTENCIA A TRACCIÓN DIAGONAL EN VIGAS

Las vigas, como cualquier otro elemento se diseñan para enfrentar distintas sollicitaciones y esfuerzos, comúnmente se habla más de la falla por flexión, pero existen otro tipo de fallas para las que es necesario que las vigas tengan un margen de seguridad pues pueden ser más catastróficas que la ya mencionada. La falla por corte en el hormigón armado es una de estas.

Según Pezeshk S. (2014), una viga sometida a sobrecargas y que no posee refuerzo de cortante, o está mal diseñado, posiblemente fallará y colapsará de manera repentina y sin previo aviso, a esto se le llama “falla frágil” y es lo que se busca evitar. Por tanto, el hormigón armado debe tener un refuerzo para este cizalle de tal manera que la viga falle por flexión, existiendo una advertencia, esto es una “falla dúctil”.

Para determinar el corte el elemento se analiza como se muestra en la Figura 2.6. En primer lugar, se debe analizar la viga como un elemento homogéneo en dos secciones:

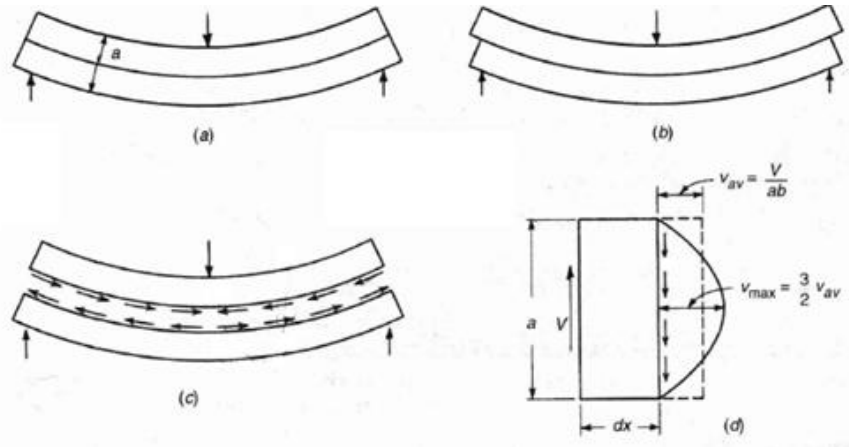


Figura 2.6 Análisis de la viga en dos secciones (Pezeshk, 2014).

Luego de analizar la viga de esta manera, se llega a que, para una viga rectangular y homogénea, la distribución de esfuerzos corresponde a la mostrada en la Figura 2.7.

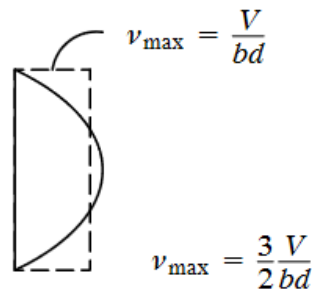


Figura 2.7 Distribución de esfuerzos (Pezeshk, 2014).

Donde se observa que el valor para la tensión al cizalle o corte promedio está dada por la Ecuación 2.1:

$$v_{prom} = \frac{V}{bd} [MPa] ; \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

mientras que el valor máximo lo entrega la Ecuación 2.2:

$$v_{m\acute{a}x} = \frac{3V}{2bd} [MPa] \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde en ambas ecuaciones:

$v$  = Tensión de corte o cizalle [MPa]

$V$  = Carga de corte [N]

$b$  = ancho de la viga [mm]

$d$  = alto de la viga [mm]

Finalmente tenemos que las trayectorias de corte y compresión en una viga rectangular homogénea se distribuyen de la siguiente manera, como se muestra en la Figura 2.8.

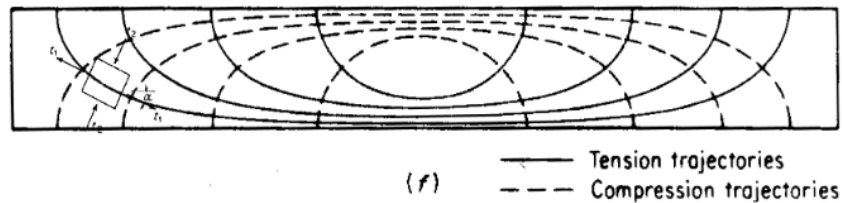


Figura 2.8 Trayectorias de corte (Pezeshk, 2014).

Donde las líneas continuas representan las trayectorias de tensión o corte y las líneas segmentadas las trayectorias de compresión.

## 2.5 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE DEL HRF

Debido a que las roturas por corte son consideradas frágiles y frente al incremento en la ductilidad del hormigón que producen las fibras (ACI Committee 544, 2002), actualmente existe un gran interés en determinar la respuesta del hormigón reforzado con fibras frente a esas condiciones de carga. Por este motivo se ha propuesto diferentes tipos de probetas y ensayos que tienen por objetivo producir esfuerzos de corte en un plano de falla predefinido (normalmente cortando entallas en las probetas), empleando barras y cargas de compresión (Barragán et al., 2006).

El ensayo de probetas tipo Z (Figura 2.9) ha sido bastante popular en la determinación de la respuesta al corte directo del hormigón (Barr, 1987). La probeta es básicamente un prisma cortado formando dos bloques tipo L, unidos a través de un plano sobre el que se producen las tensiones de corte debido a una carga de compresión externa. Sin embargo, estos ensayos son muy sensibles a excentricidad en la aplicación de la carga de compresión, lo que se traduce en roturas por flexión y no por corte. Frente a este problema experimental, se han propuesto otras alternativas de ensayo, como las vigas o paneles en flexión con una o dos entallas excéntricas y carga central o vigas con dos entallas centrales y cargas excéntricas, que se representa en la Figura 2.10 (Barr, 1987; Shah et al., 1995). Estas configuraciones de ensayo permiten la propagación de fisuras en modo mixto de fractura, es decir, en ellas se desarrollan simultáneamente componentes de tracción, en la apertura, y corte, en el deslizamiento de las cartas. (Shah et al., 1995).

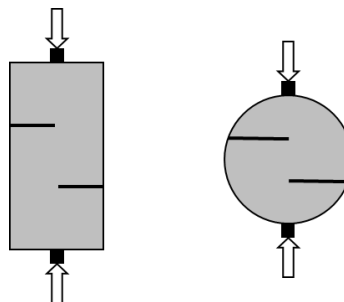


Figura 2.9 Probetas tipo Z, para ensayos de corte (Barr, 1987).

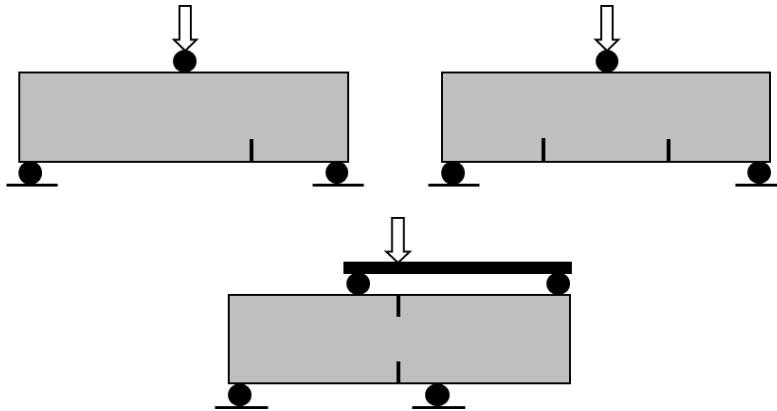


Figura 2.10 Otras probetas utilizadas para determinar comportamiento del hormigón frente a esfuerzos de corte (Shah et al., 1995).

En el procedimiento establecido en la recomendación JSCE – SF6 (JSCE, 1990), se establece el uso de la configuración mostrada en la Figura 2.11. Como se observa en ella, la carga de corte se aplica sobre una probeta prismática, de 150 [mm] de arista. Durante el ensayo, la tensión de corte se produce por medio de una carga de compresión transmitida al prisma por un bloque de acero provisto de dos cuñas, cuyas caras exteriores coinciden con el borde interno de las entallas, distantes 150 [mm] entre sí. La vigueta o prima se apoya en otras dos cuñas fijas a otro bloque rígido, separadas 155 [mm]. Entonces, es a través de una zona angosta, de 2,5 [mm] de ancho, donde se produce un campo de tensiones de corte concentradas (Mirsayah y Bantia, 2002).

Sin embargo, los primeros ensayos realizados por Mirsayah y Bantia demostraron que el plano de rotura frecuentemente no se producía en la zona angosta sometida al esfuerzo de corte, obteniendo resultados no válidos. Estos autores debieron introducir dos entallas en las probetas, en la zona de concentración de los esfuerzos, con el fin de definir dos planos de rotura, permitiendo alcanzar resultados válidos y con poca variabilidad.

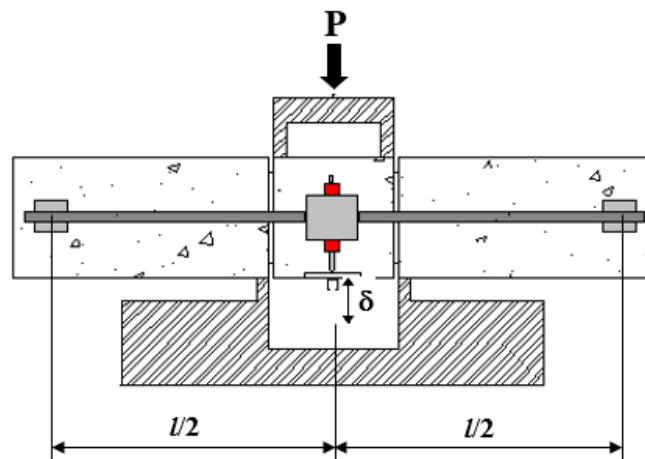


Figura 2.11 Configuración del ensayo propuesto por la recomendación japonesa SF-6.

### 3 INVESTIGACIÓN – PLAN DE TRABAJO

---

En la presente investigación se propone ensayar hormigones reforzados con fibra sintética BarChip 48, R50 y 54, en distintas cuantías, bajo efectos de falla por tracción diagonal o corte, analizando resultados para caracterización de propiedades físicas y comportamientos mecánicos del material.

La campaña experimental comienza con el estudio bibliográfico de diferentes ensayos para proponer uno que sea adecuado, junto con tener presente las consideraciones necesarias para cuantificar la resistencia al corte diagonal de hormigones reforzados. Se decide confeccionar probetas prismáticas (vigas) y cilindros de hormigón reforzado con fibras sintética en diferentes dosificaciones, específicamente 2 [kg/m<sup>3</sup>], 4 [kg/m<sup>3</sup>], 6 [kg/m<sup>3</sup>] y 8 [kg/m<sup>3</sup>] por cada tipo de fibra, existiendo, además, vigas con 0 [kg/m<sup>3</sup>] de fibra, cuyo uso será para determinar parámetros base.

También se confeccionan cilindros de 150 [mm] de diámetro y 300 [mm] de altura para ensayos de compresión y hendimiento, con tal de poder ampliar la caracterización del material compuesto.

Una vez descimbradas, son curadas durante 28 días en la cámara húmeda del laboratorio de ensayo de materiales y control de obras LEMCO, para saturación y obtención de la resistencia máxima del material.

Existe una segunda etapa, donde se pone a prueba la forma de la viga y el ensayo. Se proponen 3 tipos. En primer lugar, las vigas son de 150x150x600 [mm], con una entalla desplazada de tan solo 25 [mm]. En segundo lugar, se aumenta a una entalla de 50 [mm] y se colocan refuerzos de fibra de carbono. Por último, se pone a prueba la tercera opción consiste en un entalle de 50 milímetros a 100 milímetros del centro de la viga, para posteriormente ser cortadas longitudinalmente, perpendicular y sobre la entalla para generar dos vigas iguales de 75 x 150 milímetros de sección y que permitan una luz de 400 [mm] entre apoyos.

Mientras que a los cilindros que se someterán a compresión, a diferencia de los que serán ensayados a hendimiento, se les realiza el refrentado correspondiente en la cara de llenado, según NCh1172 (INN, 1978) vigente.

Posteriormente se da inicio a la tercera etapa relacionada al ensayo de las probetas. Las vigas serán sometidas a flexo-tracción para inducir falla por tracción diagonal, usando apoyos que permitan 40 centímetros de luz y carga, aplicada en el centro de la viga, a velocidad de deformación controlada, a 10 centímetros de la entalla antes realizada. Los cilindros serán ensayados a compresión y hendimiento, según NCh1037 y NCh1170, respectivamente.

En el caso de las vigas, también se medirá el ángulo de la trayectoria de la grieta para así estudiar su dispersión.

Una vez ensayada la cantidad de probetas necesarias, se analizan los datos y se caracterizan las propiedades y comportamientos físico-mecánicos ante el tipo de falla propuesta.

## 4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 4.1 MATERIALES

Para la confección de las probetas de HRF a estudiar, se utilizan:

1. Cemento Polpaico 400, el cual corresponde a un cemento de grado alta resistencia fabricado bajo la norma chilena NCh148.of68 “Cemento, Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales” (INN, 1968), mediante la molienda conjunta de clínquer, yeso y materiales puzolánicos.
2. Áridos, que corresponden a: arena, con un tamaño entre 0 y 5 [mm]. (Dn = 5 [mm].) y grava, con un tamaño entre 5 y 20 [mm]. (Dn = 20 [mm]); ambos fueron extraídos del río Aconcagua.
3. Aditivo plastificante Sika Viscocrete 5100 CL.
4. Agua.
5. Fibras: BarChip 48, BarChip R50, BarChip54, todas fibras sintéticas de polipropileno, con la diferencia que la R50 es polipropileno reciclado.

### 4.2 DOSIFICACIONES

La dosificación por utilizar se realizó en base a [kg/m<sup>3</sup>] de material, como se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Dosificaciones a utilizar para HRFs..

Material	Cantidad [kg/m <sup>3</sup> ]				
	I	II	III	IV	V
Fibra	0	2	4	6	8
Cemento	387				
Arena fina	120				
Arena gruesa	813				
Gravilla	947				
Agua	147				
Aditivo	1,45				

Sin embargo, para efectos prácticos del laboratorio, las dosificaciones se entregaron en cantidades por amasada, utilizando las mismas proporciones, pero para un total de 75 litros por amasada.

### 4.3 DETERMINACIÓN DE DISEÑO Y TIPO DE VIGA A ENSAYAR, Y SU JUSTIFICACIÓN

Determinar los parámetros de diseño, ya sea forma y ubicación de entallas, en las probetas a ensayar con tal de lograr determinar su comportamiento bajo sollicitaciones de cizalle, como también la configuración del equipo, es decir, posicionamiento, velocidades y tiempos, se realiza de forma experimental con base en la bibliografía (ensayos conocidos, normas y estudios), analizando los resultados obtenidos (forma del gráfico, valores máximos, deformación máxima, etc.) y con un criterio visual de la tipología de falla; todo esto con tal de determinar su efectividad.

En primer lugar, se confeccionan probetas prismáticas de 150x150x600 [mm], las que llamamos vigas. Ciertas configuraciones presentan problemas, por lo que a continuación se describen las 3 formas que se consideraron para ensayar estas vigas, siendo la última la óptima y utilizada para el resto de la investigación. Todos los casos corresponden a viga doblemente apoyada con carga central y cuyo fin era el de lograr inducir la falla en un plano inclinado.

- 1) A estas vigas iniciales se les realiza una entalla, ubicada a 100 [mm] del centro, con una profundidad de 25 [mm]. Se ensaya la viga con una luz de 500 [mm] entre apoyos, una carga en el centro de la viga y velocidad inicial constante de 0,3 [ $\mu\text{m/s}$ ]. Los resultados obtenidos son inconcluyentes debido a que las probetas, en su gran mayoría, colapsan por flexión. Este colapso ocurre en el centro, por lo que la entalla no tiene efecto. Además, no se logra apreciar el efecto de la fibra debido a la falla frágil que se observa.
- 2) Con el fin de lograr inducir falla de corte en las vigas en el plano de 45°, o cercano, y que, por tanto, la entalla sea el lugar de nacimiento de la grieta principal, se propone que sean reforzadas con malla de fibra de carbono pegadas en la cara de la entalla, cumpliendo con periodos necesarios según proveedor para mejor rendimiento. La utilización de fibra de carbono como refuerzo es ampliamente usada y estudiada. Se puede pasar de una falla frágil a una falla dúctil por cortante mediante la aplicación de láminas de FRP como refuerzo externo a cortante (Landa, 2002). Sin embargo, nuevamente se obtiene resultados y valores no satisfactorios. En base al mismo procedimiento y concepto, se reemplaza el reforzamiento de fibra de carbono por una placa de acero adherida a la cara de la entalla. Los ensayos no presentan resultados coherentes entre las probetas de igual dosificación de fibra, en general debido a que ahora lo que se ensaya es prácticamente la capacidad de la placa de acero.
- 3) Finalmente, se decide modificar dimensiones de las probetas, proponiendo vigas de 75x150x600 [mm]. y entalla a 100 [mm] del centro con profundidad de 50 [mm]. Estas medidas son muy cercanas a las propuestas por Shah et al. (1995). Las vigas son obtenidas al realizar una profundización de entalla a las vigas ya confeccionadas y luego hacer un corte longitudinal, perpendicular y por la misma cara de la entalla, con tal de conseguir dos vigas. Además, se modifica configuración del equipo de ensayo, dejando como luz entre los apoyos una longitud igual a 400 [mm]. Respecto a las velocidades, se propone mantener lo ya propuesto, aumentado cada cierto tiempo una vez estabilizada la carga, específicamente en la zona posterior a la falla del hormigón. Las pruebas del ensayo muestran agrietamiento por tracción diagonal y datos coherentes a lo esperado, por lo que se define como ensayo base para la investigación de la presente memoria. Las velocidades de apertura de grieta también se adecuan, no presentando esfuerzos incoherentes debido a cargar demasiado rápido.

## **4.4 ENSAYOS PARA CARACTERIZAR EL HRF**

### **4.4.1 Ensayo de compresión**

Se realiza ensayo de rotura por compresión a probetas cilíndricas de 150x300 [mm], fabricadas según NCh1017 (INN, 1975), y ensayadas según NCh1037. En primer lugar, se ejecuta medición dimensiones (altura y diámetro) y se determina la masa de cada probeta; posteriormente se rectifica (Figura 4.1) la cara de llenado según norma chilena NCh1172, la cual establece la homogeneidad del plano de carga en contacto con el equipo de ensayo.



Figura 4.1 Rectificador Hi-Kenma

Posteriormente para realizar el ensayo en sí, se utiliza el equipo Controls C35Z00 (Figura 4.2), que posee un rango de carga de 3000 kN. Las placas de carga deben estar limpias y libre de cualquier tipo de resto o partícula que evite el correcto posicionamiento de la probeta, procurando que está además este correctamente posicionada.



Figura 4.2 Equipo Controls C35Z00.

La probeta es colocada correctamente al centro para comenzar con el ensayo, asentando la placa superior sobre la probeta, esta se guía suavemente con la mano para obtener un apoyo lo más uniforme posible para comenzar con la aplicación de carga de forma constante. Se da por finalizado al obtener la carga máxima, se registra y posteriormente se calcula la resistencia a la compresión, según la siguiente expresión (Ecuación 4.1):

$$R = \frac{P}{S} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

$R = \text{Tensión de rotura}, \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right]; \text{ también denominada } f'_c$

$P = \text{Carga máxima aplicada}, [N]$

$S = \text{Sección de ensayo}, [\text{mm}^2]$

#### 4.4.2 Ensayo de hendimiento

El ensayo de tracción por hendimiento a la rotura de probetas cilíndricas, fabricadas bajo la misma norma que las usadas para compresión, está descrito en la NCh1170. Consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando la carga de manera uniforme a lo largo de una línea o generatriz hasta alcanzar la rotura. Se coloca una tablilla de apoyo de madera de  $4 \pm 1$  [mm] de espesor, que tiene como finalidad distribuir la carga y evitar efectos locales de concentración de tensiones en posibles puntos de irregularidad geométrica de la probeta y, de esa manera, evitar aplastamiento o fisuración múltiple en las zonas de carga. En la Figura 4.3 se observa la posición de ensayo.

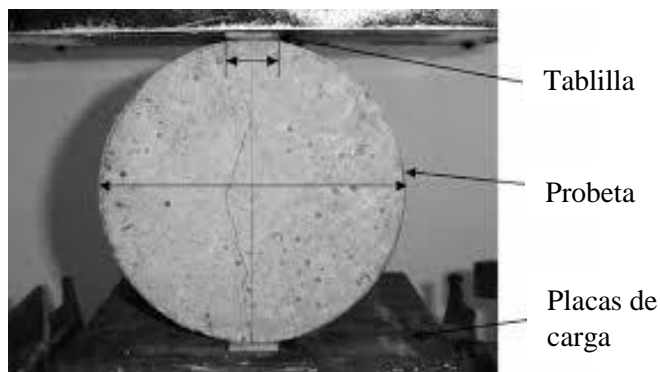


Figura 4.3 Posición del cilindro y las tablillas.

El ensayo se da por finalizado cuando se alcanza la carga máxima de rotura, la que se utiliza para calcular la resistencia a tracción por hendimiento como la tensión de rotura según la siguiente ecuación (Ecuación 4.2) presente en la norma:

$$T = \frac{2 P}{\pi l d} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

$T$  = Resistencia a tracción por hendimiento, [ $N/mm^2$ ]

$P$  = Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo, [ $N$ ]

$l$  = longitud de la probeta, [ $mm$ ]

$d$  = diámetro de la probeta, [ $mm$ ]

Para efectos de esta memoria, los resultados son entregados de forma inmediata por el equipo Controls C35Z00 a través del Datamanager en el formato que se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.4 Formato de entrega de resultados.

#### 4.4.3 Ensayo de tracción diagonal propuesto

A continuación, la descripción del ensayo de tracción para vigas de HRF para inducir corte en un plano diagonal. Para determinar la resistencia al corte diagonal de vigas de hormigón sometidas a flexión, se ensayarán vigas de hormigón en masa y vigas de hormigón reforzado con fibras con entallas excéntricas, desplazadas 100 [mm] desde su centro, con el fin de caracterizar el comportamiento de la mezcla en estudio ante solicitaciones de tracción diagonal o corte.

Se realiza ensayo tipo “viga doblemente apoyada con carga central” a probetas prismáticas de sección 75x150 [mm] y largo aproximado de 600 [mm], permitiendo la luz de ensayo correspondiente a 400 [mm]. entre apoyos (Figura 4.5). Las probetas son confeccionadas con sección 150x150 [mm], motivo por lo que deben ser cortadas en el plano longitudinal para obtener dos probetas con la sección deseada. Una vez realizado el corte y obtención de probetas con sección 75x150x600 [mm], estas son trasladadas a la cámara húmeda para ser saturadas en las dependencias del laboratorio de ensayo de materiales y control de obras (LEMCO) de la universidad, y posterior a 28 días para lograr resistencia máxima del material, comienzan los ensayos.

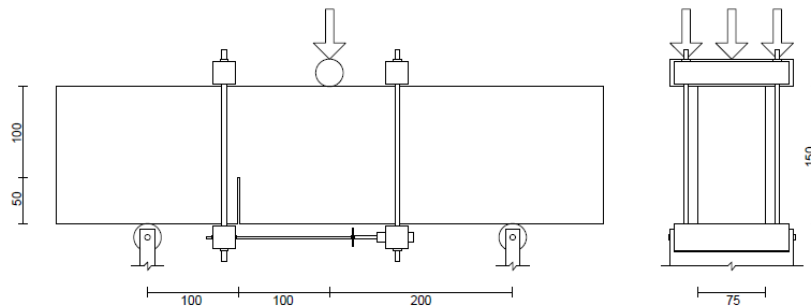


Figura 4.5 Disposición de la viga a ensayar.

Los pasos para el correcto ensayo son:

1. Demarcar el centro y los apoyos en la viga, situar en el equipo de ensayo y colocar el aparataje, entre ellos la placa de vidrio y el LDVT como se muestra en la Figura 4.6.
2. Iniciar el ensayo con una velocidad constante de deformación de 0,3 [ $\mu\text{m/s}$ ].

3. Una vez superada la carga máxima, y comenzado el descenso, esperar que alcance el 75% aproximadamente del valor máximo obtenido. En ese momento, comenzar la variación de velocidad, aumentándola en 0,25 [ $\mu\text{m/s}$ ] cada 120 segundos aproximadamente, es decir, cada 30 micras de incremento en la deformación.
4. Aumentar la velocidad hasta llegar a 5 [ $\mu\text{m/s}$ ], posterior a este punto no se permiten más incrementos en la velocidad.
5. Una vez alcanzados los 5000 [ $\mu\text{m}$ ] de desplazamiento o previo colapso de la viga de da por finalizado el ensayo.
6. Se detiene el ensayo y se retira la probeta.
7. Se realiza la medición del ángulo (Figura 4.5) de la grieta por ambos lados y se promedia.

El ensayo se lleva a cabo en una prensa servo controlada con capacidad de 100 [kN] de carga y se controla a través del programa MCC8 Multitest.

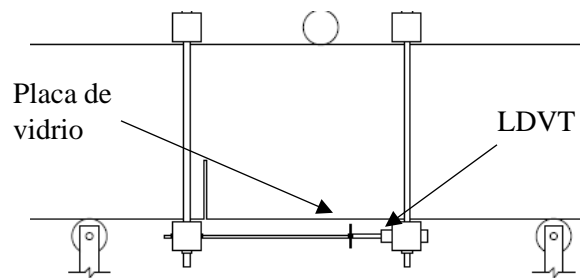


Figura 4.6 Posición placa y LDVT.

Una vez terminado el ensayo, para poder realizar el análisis se debe corregir el CMOD (Desplazamiento de la apertura de la boca de grieta, por sus siglas en inglés) para cada dato. Esto debido a la posición del transductor respecto a la entalla (Figura 4.7). La siguiente ecuación (Ecuación 4.3) presenta la corrección:

$$AG = \frac{CMOD \times 150 [mm]}{171 [mm]} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

$AG =$  Apertura de grieta [mm]

$CMOD =$  Desplazamiento obtenido en el ensayo [mm]

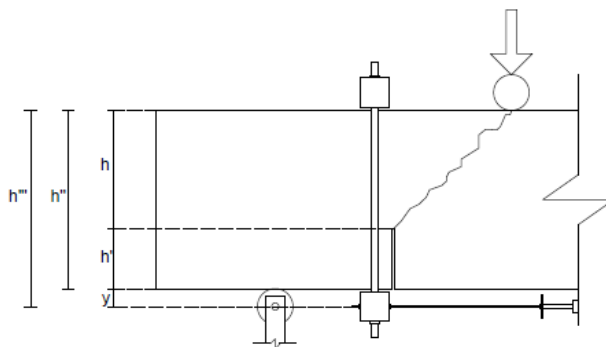


Figura 4.7 Esquema de corrección CMOD. Donde  $h=100$  [mm],  $h'=50$  [mm],  $h''=150$  [mm],  $h'''=171$  [mm] e  $y=21$  [mm].

En cuanto al análisis de los datos, estos serán graficados y comparados. Además, se debe calcular la tensión de corte según la Ecuación 2.2, resultados que serán comparados con la ecuación entregada por el ACI para la resistencia de la matriz al cizalle. Esta ecuación se presenta a continuación (Ecuación 4.4):

$$v_u = 0,166\sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad \text{(Ecuación 4.4)}$$

$v_u$  = Tensión de corte o cizalle [MPa]

$f'_c$  = Resistencia a la compresión cilíndrica del hormigón [MPa]

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

Se presentan los resultados obtenidos para los diferentes ensayos, en base a la normativa presentada y al ensayo propuesto, para las diferentes probetas, ya sea vigas o cilindros. Además se informan a través de tablas y/o gráficos para su análisis.

La nomenclatura utilizada es igual para las diferentes probetas de los distintos ensayos, tanto con fibra como sin ella, y corresponde a:

$$XX - YY - Z$$

*XX = "BC" para hormigones con fibras BarChip y "HO" para hormigones simples*

*YY = Identificador de la fibra, 48, 50 o 54; "00" de no tener fibra*

*Z = Dosificación de fibra, expresada en  $\frac{Kg}{m^3}$ ; "00" de no tener fibra*

### 5.1 RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de rotura por compresión a probetas cilíndricas para las diferentes dosificaciones de HRF.

*Tabla 5.1 Resultados ensayo de compresión para hormigones en masa y con fibra BC 48*

Ítem	Identificador	R [MPa]	Promedio R [MPa]	Desv. Std.	C.V %
1	HO-00-0	26,30	26,07	0,25	0,97%
2	HO-00-0	26,10			
3	HO-00-0	25,80			
4	BC-48-2	29,04	27,94	1,28	4,59%
5	BC-48-2	28,24			
6	BC-48-2	26,53			
7	BC-48-4	31,99	31,85	0,51	1,60%
8	BC-48-4	31,28			
9	BC-48-4	32,27			
10	BC-48-6	33,33	32,57	0,98	3,01%
11	BC-48-6	31,46			
12	BC-48-6	32,91			
13	BC-48-8	23,75	24,66	0,97	3,94%
14	BC-48-8	24,54			
15	BC-48-8	25,68			

Tabla 5.2 Resultados ensayo de compresión para hormigones con fibra BC R50

Ítem	Identificador	R [MPa]	Promedio R [MPa]	Desv. Std.	C.V %
16	BC-50-2	26,43	29,88	2,99	10,01%
17	BC-50-2	31,50			
18	BC-50-2	31,72			
19	BC-50-4	32,11	30,73	1,21	3,94%
20	BC-50-4	30,20			
21	BC-50-4	29,87			
22	BC-50-6	24,92	25,27	0,86	3,42%
23	BC-50-6	24,63			
24	BC-50-6	26,25			
25	BC-50-8	31,88	33,49	1,41	4,22%
26	BC-50-8	34,53			
27	BC-50-8	34,05			

Tabla 5.3 Resultados ensayo de compresión para hormigones con fibra BC 54

Ítem	Identificador	R [MPa]	Promedio R [MPa]	Desv. Std.	C.V %
28	BC-54-2	29,48	30,09	0,54	1,78%
29	BC-54-2	30,30			
30	BC-54-2	30,49			
31	BC-54-4	30,65	31,31	1,18	3,77%
32	BC-54-4	32,67			
33	BC-54-4	30,60			
34	BC-54-6	40,35	39,86	0,85	2,14%
35	BC-54-6	40,35			
36	BC-54-6	38,87			
37	BC-54-8	32,37	34,57	3,88	11,23%
38	BC-54-8	39,05			
39	BC-54-8	32,28			

De las tablas se puede observar cómo la resistencia frente a la compresión aumenta ligeramente con el aporte de las fibras, sin mayor distinción entre ellas. Además, se observa, cómo llegado a cierta dosis, la fibra parece interferir con la resistencia propia del hormigón. Recordar que frente a compresión el hormigón de por sí es un material excelente.

## 5.2 RESULTADOS ENSAYO DE HENDIMIENTO

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de rotura por hendimiento a probetas cilíndricas para las diferentes dosificaciones de HRF. Se utilizó dos probetas para cada dosis de las distintas fibras.

*Tabla 5.4 Resultados ensayo de hendimiento para todas las probetas*

Ítem	Identificador	T [MPa]	Promedio T [MPa]
1	HO-00-0	2,30	2,29
2		2,27	
3	BC 48-2	3,37	2,98
4		2,59	
5	BC 48-4	3,09	2,70
6		2,31	
7	BC 48-6	2,57	3,04
8		3,51	
9	BC 48-8	3,01	3,08
10		3,14	
11	BC 50-2	3,52	3,51
12		3,50	
13	BC 50-4	2,98	3,27
14		3,56	
15	BC 50-6	2,85	2,74
16		2,63	
17	BC 50-8	3,78	3,83
18		3,89	
19	BC 54-2	2,84	2,78
20		2,72	
21	BC 54-4	2,89	2,87
22		2,84	
23	BC 54-6	3,69	3,69
24		3,69	
25	BC 54-8	3,12	3,37
26		3,63	

De las tablas se puede observar cómo la resistencia a tracción por hendimiento aumenta con el aporte de las fibras, sin mayor distinción entre ellas. La tendencia es positiva, pero llegado un punto, la cantidad de fibra afecta de manera negativa la resistencia, al igual como sucedió en el ensayo de compresión.

### 5.3 RESULTADOS ENSAYO A TRACCIÓN DIAGONAL (PROPUESTO)

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de tracción diagonal para inducir corte a vigas confeccionadas para las diferentes dosificaciones de HRF, ensayo que es el corazón de la presente memoria. Se utilizó 6 probetas por dosis de las cuales se descartan 3 en cada caso, dejando las 3 restantes para análisis. A continuación, se presentan los resultados.

Recordar que el equipo MCC8 Multitest entrega los datos de CMOD en [ $\mu\text{m}$ ] y estos son corregidos según la Ecuación 4.3 para determinar el desplazamiento efectivo, siendo este último el graficado e informado en milímetros.

#### 5.3.1 Vigas de Hormigón en masa

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón en masa, es decir, hormigón sin fibra, y que será la referencia para futuras comparaciones se muestra en el Gráfico 5.1. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.5 y Tabla 5.6.

Gráfico 5.1 Curva promedio de la gráfica de "esfuerzo-deformación" de las vigas de hormigón en masa

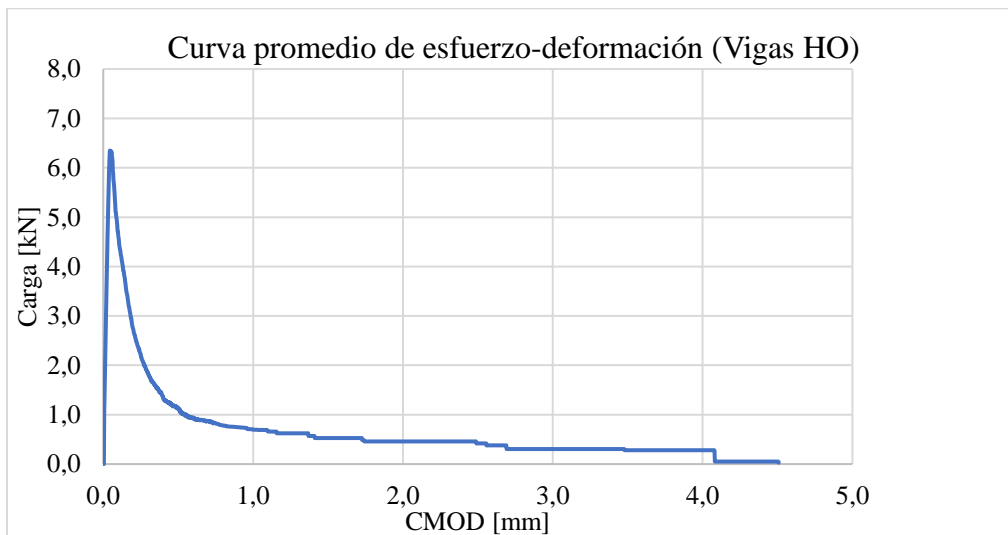


Tabla 5.5 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas de hormigón en masa

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,044	7,090
2	0,058	6,595
3	0,048	6,014
<b>Promedio</b>	<b>0,05</b>	<b>6,566</b>

Tabla 5.6 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para hormigones en masa

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	0,902	0,637	0,367	0,247	0,247
2	1,385	0,770	0,665	0,442	0,442
3	1,145	0,690	0,343	0,224	0,153
<b>Promedio</b>	<b>1,144</b>	<b>0,699</b>	<b>0,458</b>	<b>0,304</b>	<b>0,281</b>

### 5.3.2 Vigas con fibras BarChip 48

#### 5.3.2.1 Dosificación de 2 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 48 en dosis de [2 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.2. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.7 y Tabla 5.8.

Gráfico 5.2 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 48-2

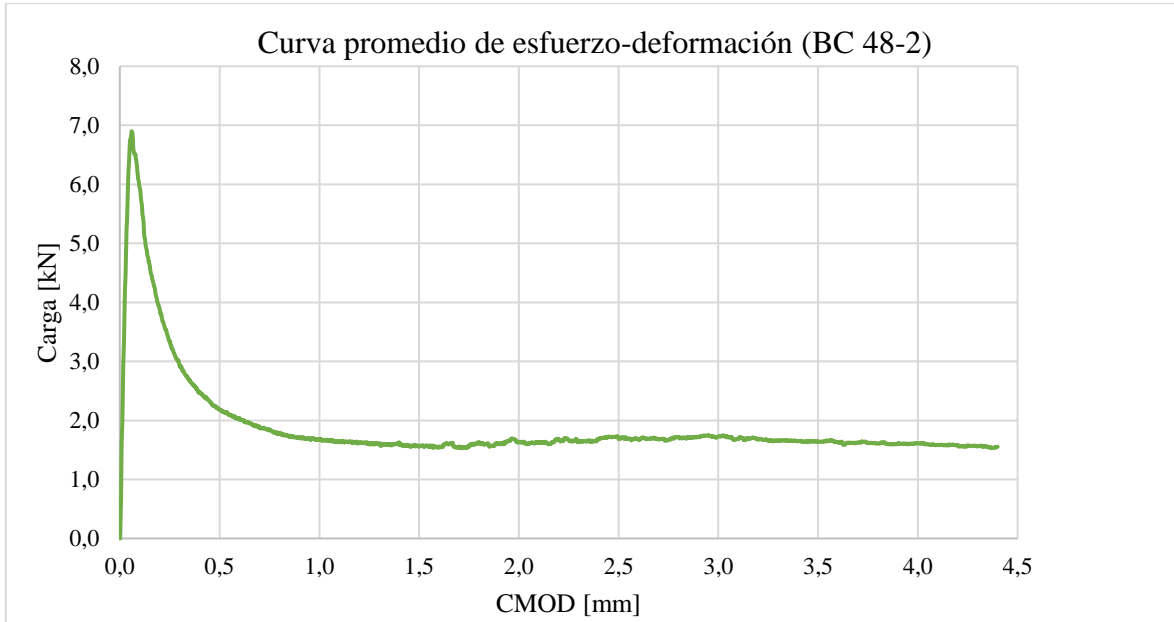


Tabla 5.7 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-2

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,082	7,246
2	0,076	6,931
3	0,052	7,155
<b>Promedio</b>	<b>0,070</b>	<b>7,111</b>

Tabla 5.8 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-2

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	2,620	1,932	1,773	1,911	1,915
2	1,812	1,477	1,359	1,494	1,468
3	2,097	1,643	1,762	1,752	1,450
<b>Promedio</b>	<b>2,176</b>	<b>1,684</b>	<b>1,631</b>	<b>1,719</b>	<b>1,611</b>

### 5.3.2.2 Dosificación de 4 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 48 en dosis de [4 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.3. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.9 y Tabla 5.10.

Gráfico 5.3 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 48-4

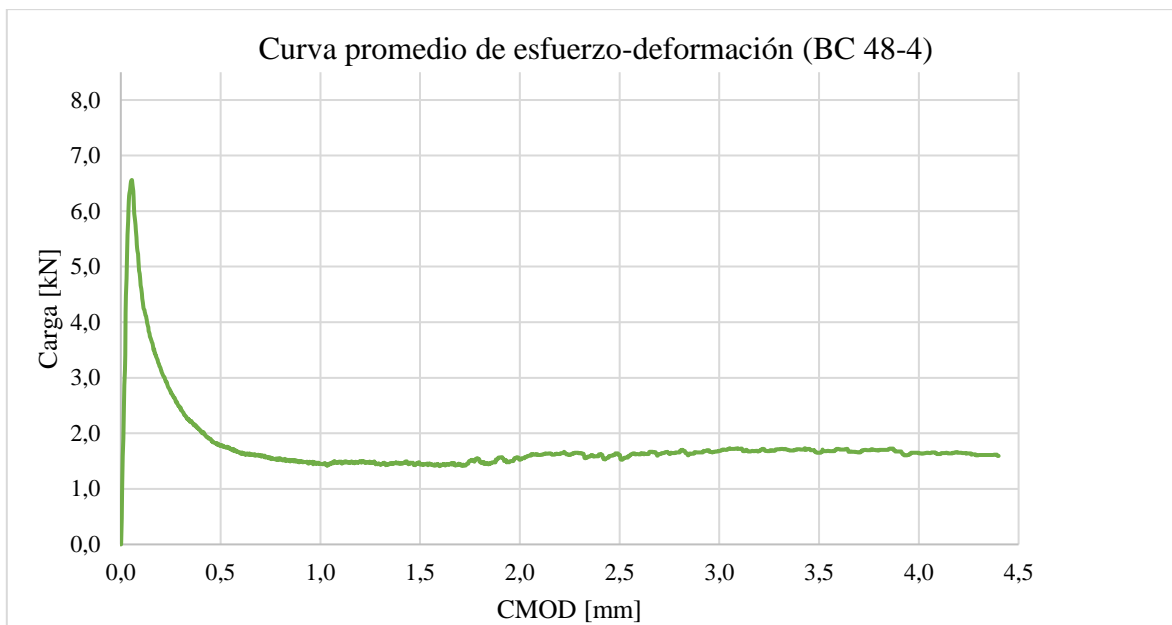


Tabla 5.9 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-4

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,052	4,896
2	0,054	6,882
3	0,060	8,068
<b>Promedio</b>	<b>0,055</b>	<b>6,615</b>

Tabla 5.10 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-4

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	1,215	0,980	1,239	1,220	1,138
2	1,161	0,849	0,991	1,081	1,133
3	2,942	2,520	2,344	2,758	2,644
<b>Promedio</b>	<b>1,773</b>	<b>1,450</b>	<b>1,525</b>	<b>1,686</b>	<b>1,638</b>

### 5.3.2.3 Dosificación de 6 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 48 en dosis de [6 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.4. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.11 y Tabla 5.12.

Gráfico 5.4 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 48-6

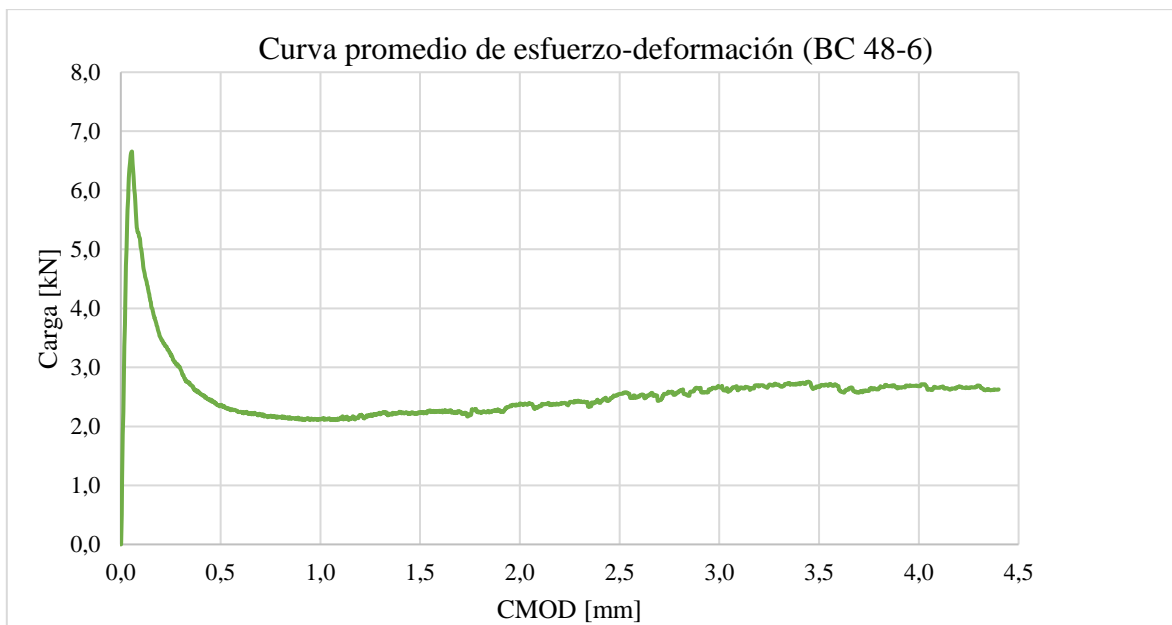


Tabla 5.11 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-6

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,060	6,916
2	0,048	6,691
3	0,056	6,880
<b>Promedio</b>	<b>0,055</b>	<b>6,829</b>

Tabla 5.12 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-6

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	2,637	2,271	2,115	2,572	2,622
2	1,970	1,859	2,387	2,637	2,778
3	2,450	2,236	2,667	2,794	2,645
<b>Promedio</b>	<b>2,352</b>	<b>2,122</b>	<b>2,390</b>	<b>2,668</b>	<b>2,682</b>

### 5.3.2.4 Dosificación de 8 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 48 en dosis de [6 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.5. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.13 y Tabla 5.14.

Gráfico 5.5 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 48-8

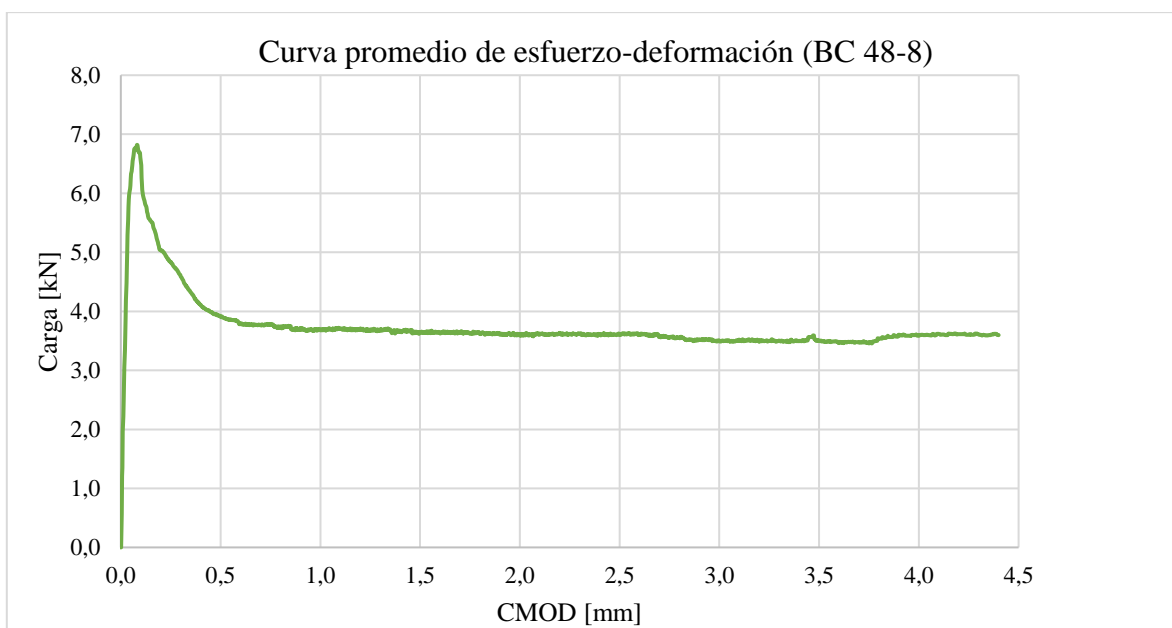


Tabla 5.13 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 48-8

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,084	6,823
2	0,082	6,825
3	0,082	6,836
<b>Promedio</b>	<b>0,083</b>	<b>6,828</b>

Tabla 5.14 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 48-8

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	3,920	3,705	3,619	3,468	3,726
2	4,009	3,684	3,612	3,418	3,421
3	3,800	3,638	3,586	3,590	3,607
<b>Promedio</b>	<b>3,910</b>	<b>3,676</b>	<b>3,606</b>	<b>3,492</b>	<b>3,585</b>

### 5.3.3 Vigas con fibras BarChip R50

#### 5.3.3.1 Dosificación de 2 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip R50 en dosis de [2 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.6. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.15 y Tabla 5.16.

Gráfico 5.6 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 50-2

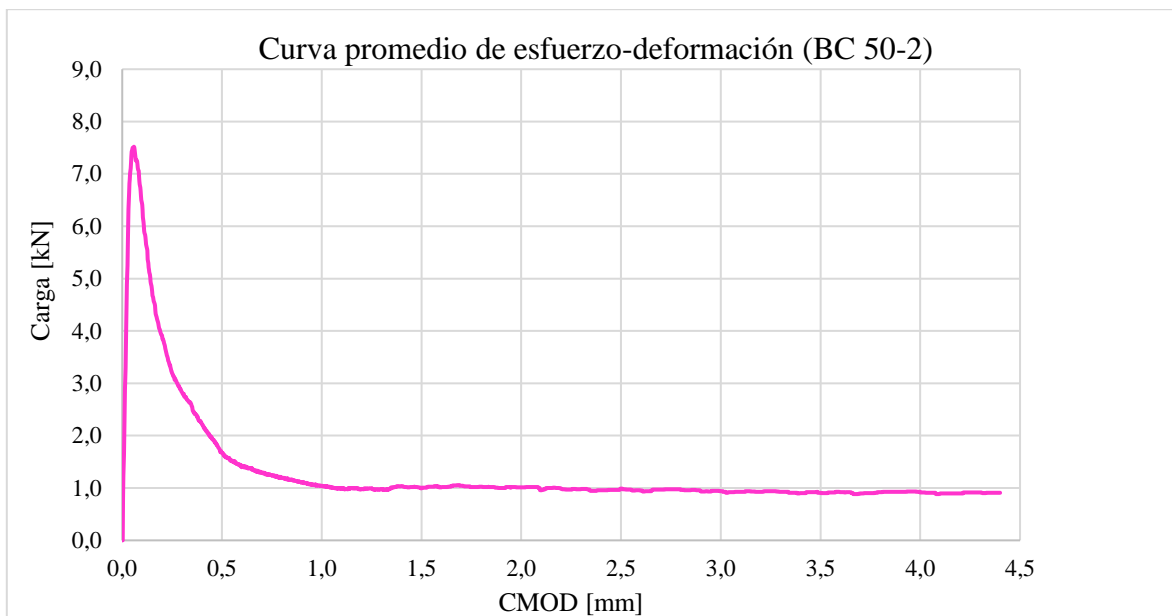


Tabla 5.15 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-2

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,060	8,452
2	0,076	8,225
3	0,036	7,516
<b>Promedio</b>	<b>0,057</b>	<b>8,064</b>

Tabla 5.16 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-2

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	1,224	0,795	1,042	1,035	1,100
2	2,658	1,632	1,476	1,299	1,164
3	1,128	0,705	0,521	0,487	0,477
<b>Promedio</b>	<b>1,670</b>	<b>1,044</b>	<b>1,013</b>	<b>0,940</b>	<b>0,914</b>

### 5.3.3.2 Dosificación de 4 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip R50 en dosis de [4 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.7. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.17 y Tabla 5.18.

Gráfico 5.7 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 50-4

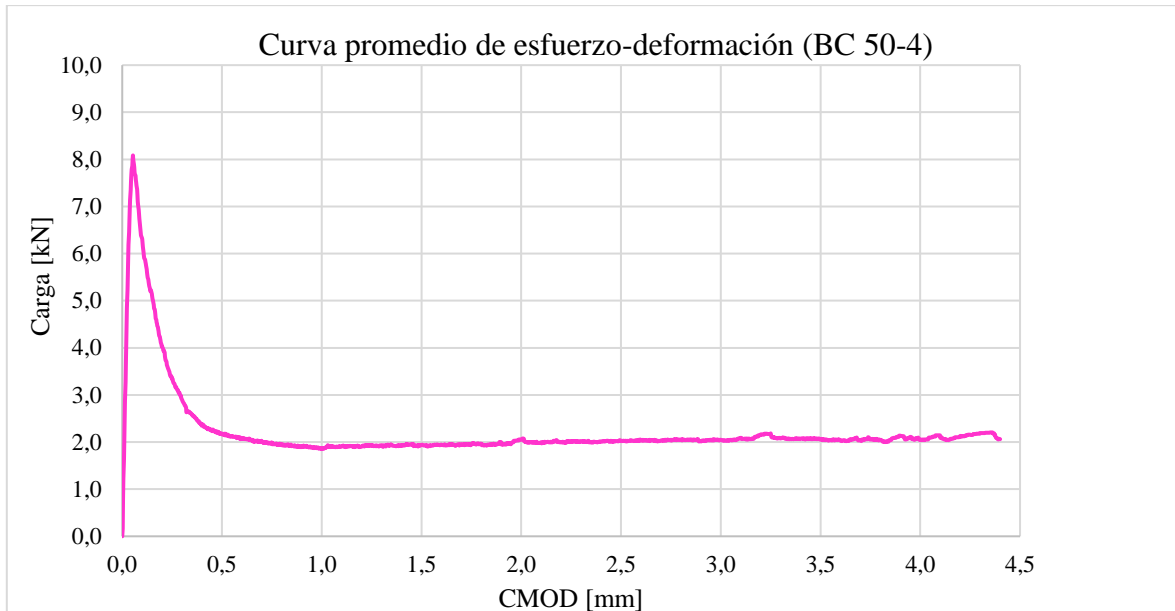


Tabla 5.17 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-4

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,054	8,056
2	0,046	6,626
3	0,060	9,807
<b>Promedio</b>	<b>0,053</b>	<b>8,163</b>

Tabla 5.18 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-4

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	2,421	2,045	2,045	2,045	2,045
2	1,265	1,080	1,190	1,239	1,220
3	2,835	2,463	2,911	2,854	2,869
<b>Promedio</b>	<b>2,174</b>	<b>1,863</b>	<b>2,049</b>	<b>2,046</b>	<b>2,045</b>

### 5.3.3.3 Dosificación de 6 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip R50 en dosis de [6 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.8. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.19 y Tabla 5.20.

Gráfico 5.8 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 50-6

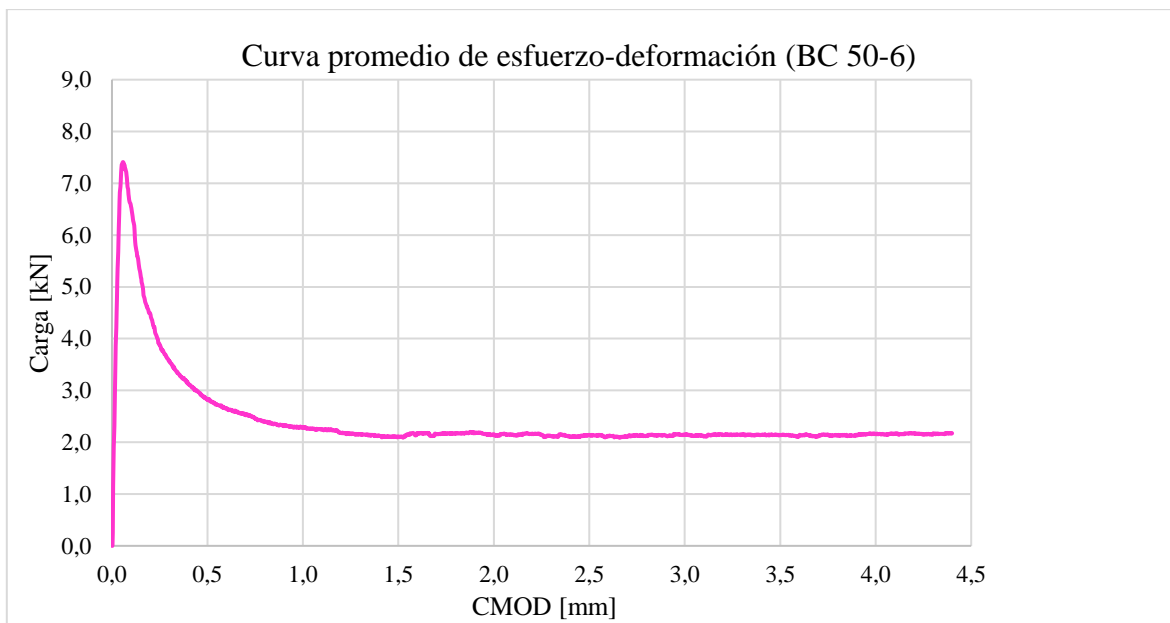


Tabla 5.19 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-6

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,072	8,437
2	0,052	7,828
3	0,064	6,740
<b>Promedio</b>	<b>0,063</b>	<b>7,668</b>

Tabla 5.20 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-6

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	2,873	2,280	1,957	2,069	2,177
2	2,326	1,975	2,363	2,499	2,550
3	3,254	2,626	2,145	1,868	1,744
<b>Promedio</b>	<b>2,818</b>	<b>2,294</b>	<b>2,155</b>	<b>2,145</b>	<b>2,157</b>

### 5.3.3.4 Dosificación de 8 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip R50 en dosis de [8 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.9. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.21 y Tabla 5.22.

Gráfico 5.9 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 50-8

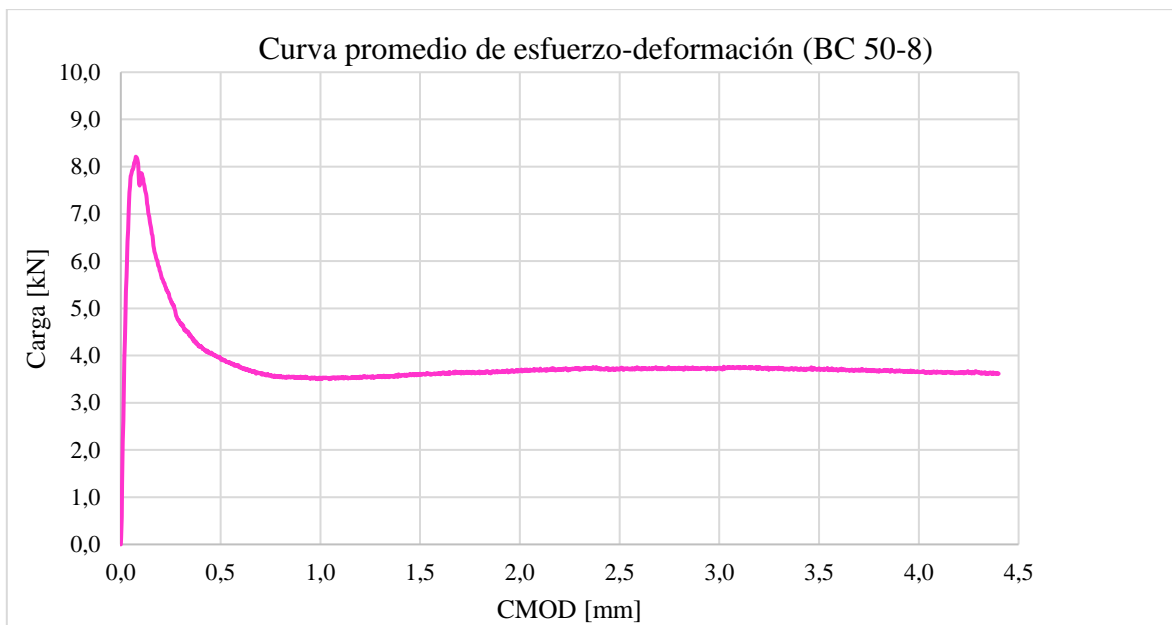


Tabla 5.21 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 50-8

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,078	9,077
2	0,076	7,597
3	0,106	8,013
<b>Promedio</b>	<b>0,087</b>	<b>8,229</b>

Tabla 5.22 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 50-8

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	4,863	4,439	4,578	4,767	4,745
2	3,386	2,912	3,164	3,291	3,295
3	3,566	3,174	3,292	3,152	2,921
<b>Promedio</b>	<b>3,938</b>	<b>3,508</b>	<b>3,678</b>	<b>3,737</b>	<b>3,654</b>

### 5.3.4 Vigas con fibras Barchip 54

#### 5.3.4.1 Dosificación de 2 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 54 en dosis de [2 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.10. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.23 y Tabla 5.24.

Gráfico 5.10 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 54-2

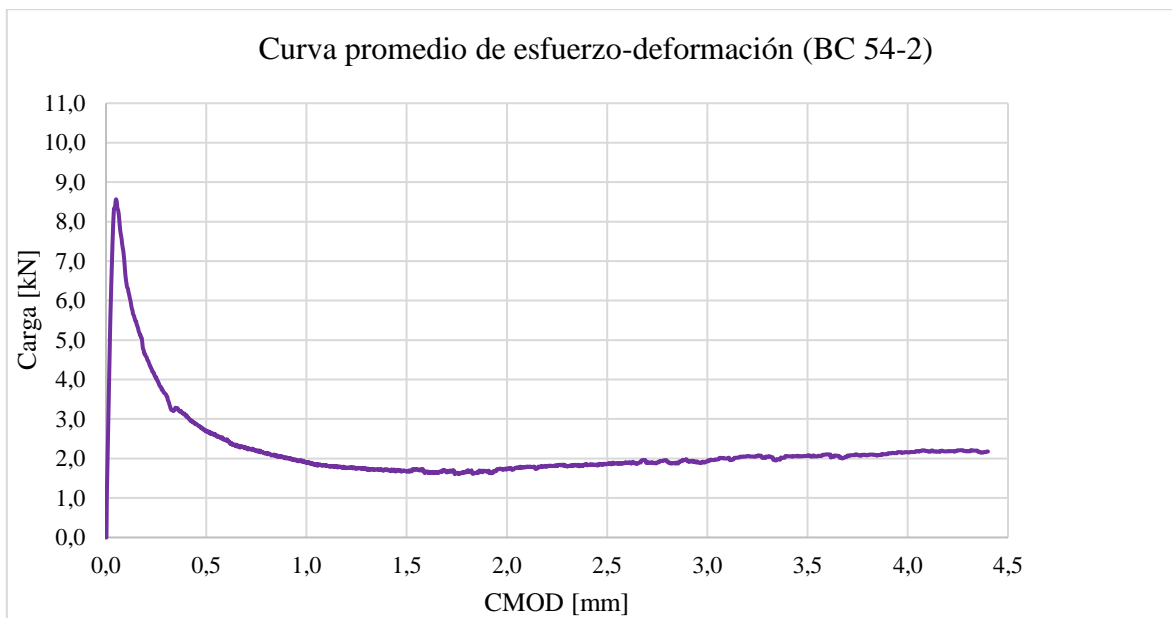


Tabla 5.23 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-2

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,040	8,280
2	0,060	9,897
3	0,048	8,216
<b>Promedio</b>	<b>0,049</b>	<b>8,798</b>

Tabla 5.24 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-2

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	2,740	1,736	1,466	1,634	1,623
2	2,907	1,864	1,612	1,839	2,114
3	2,395	2,096	2,106	2,300	2,726
<b>Promedio</b>	<b>2,681</b>	<b>1,899</b>	<b>1,728</b>	<b>1,924</b>	<b>2,154</b>

### 5.3.4.2 Dosificación de 4 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 54 en dosis de [4 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.11. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.25 y Tabla 5.26.

Gráfico 5.11 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 54-4

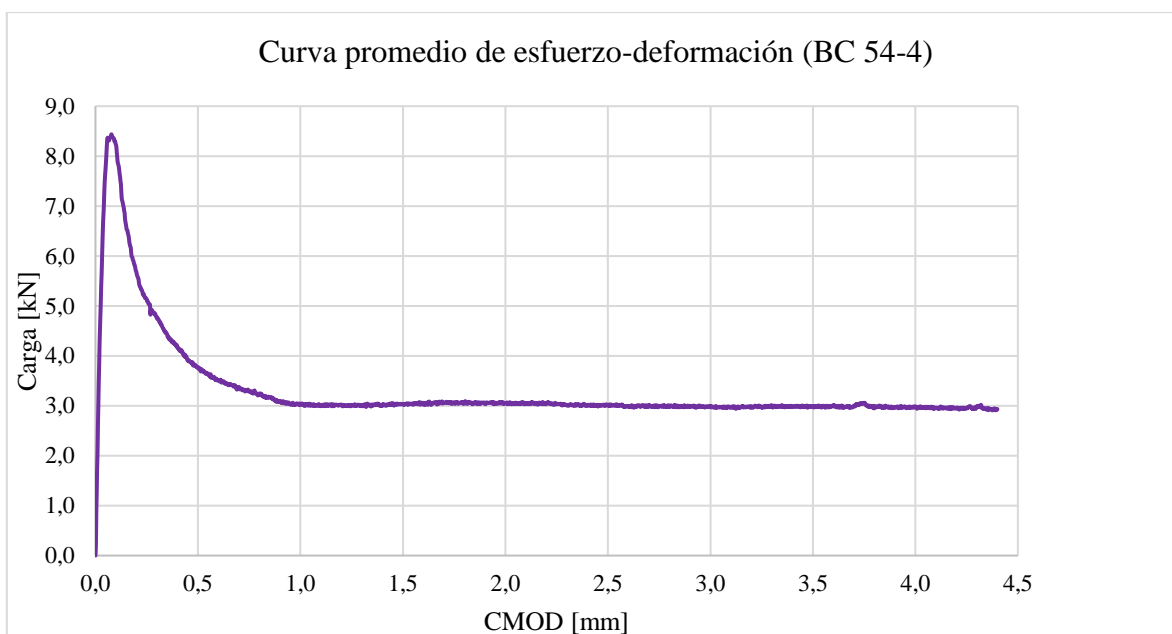


Tabla 5.25 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-4

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,068	6,918
2	0,060	9,431
3	0,096	10,047
<b>Promedio</b>	<b>0,075</b>	<b>8,799</b>

Tabla 5.26 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-4

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	2,679	2,471	2,690	2,660	2,678
2	3,989	3,173	3,228	3,126	3,081
3	4,587	3,414	3,235	3,200	3,188
<b>Promedio</b>	<b>3,752</b>	<b>3,019</b>	<b>3,051</b>	<b>2,995</b>	<b>2,982</b>

### 5.3.4.3 Dosificación de 6 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 54 en dosis de [6 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.12. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.27 y Tabla 5.28.

Gráfico 5.12 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 54-6

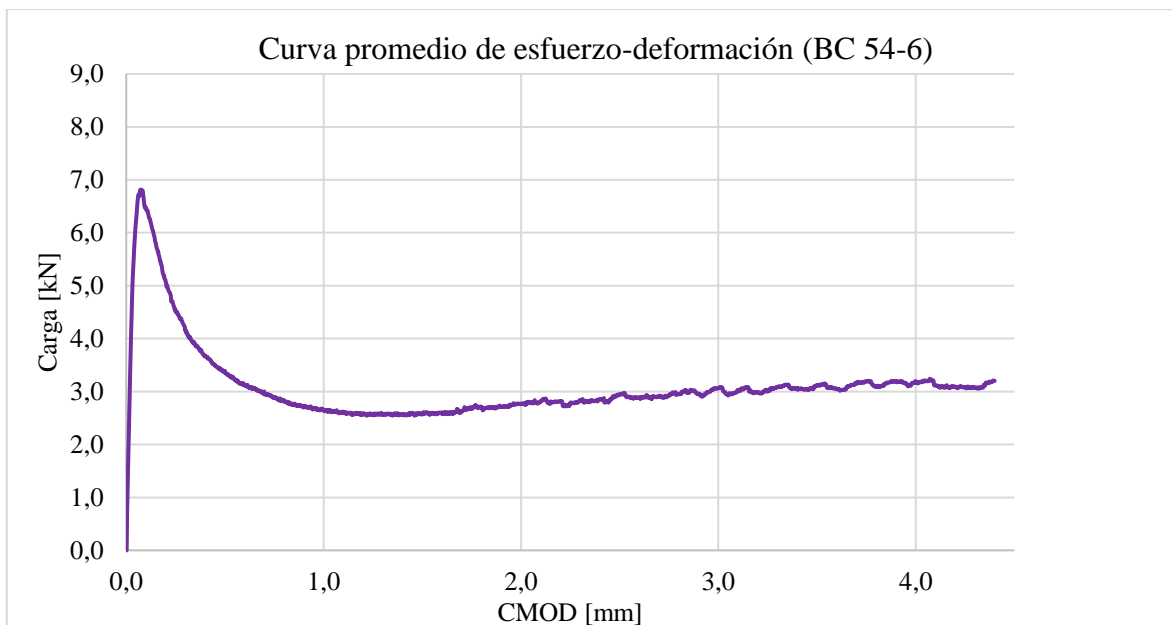


Tabla 5.27 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-6

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,090	7,644
2	0,080	6,436
3	0,058	7,138
<b>Promedio</b>	<b>0,076</b>	<b>7,073</b>

Tabla 5.28 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-6

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	3,277	2,559	2,765	2,959	3,059
2	3,448	2,907	2,839	3,379	3,544
3	3,431	2,491	2,692	2,834	2,972
<b>Promedio</b>	<b>3,385</b>	<b>2,652</b>	<b>2,765</b>	<b>3,057</b>	<b>3,192</b>

### 5.3.4.4 Dosificación de 8 kg/m<sup>3</sup>

La curva promedio de esfuerzo-deformación obtenida para las vigas de hormigón con fibra BarChip 54 en dosis de [8 kg/m<sup>3</sup>] se muestra en el Gráfico 5.13. Mientras que los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.29 y Tabla 5.30.

Gráfico 5.13 Curva promedio de la gráfica de “esfuerzo-deformación” para vigas BC 54-8

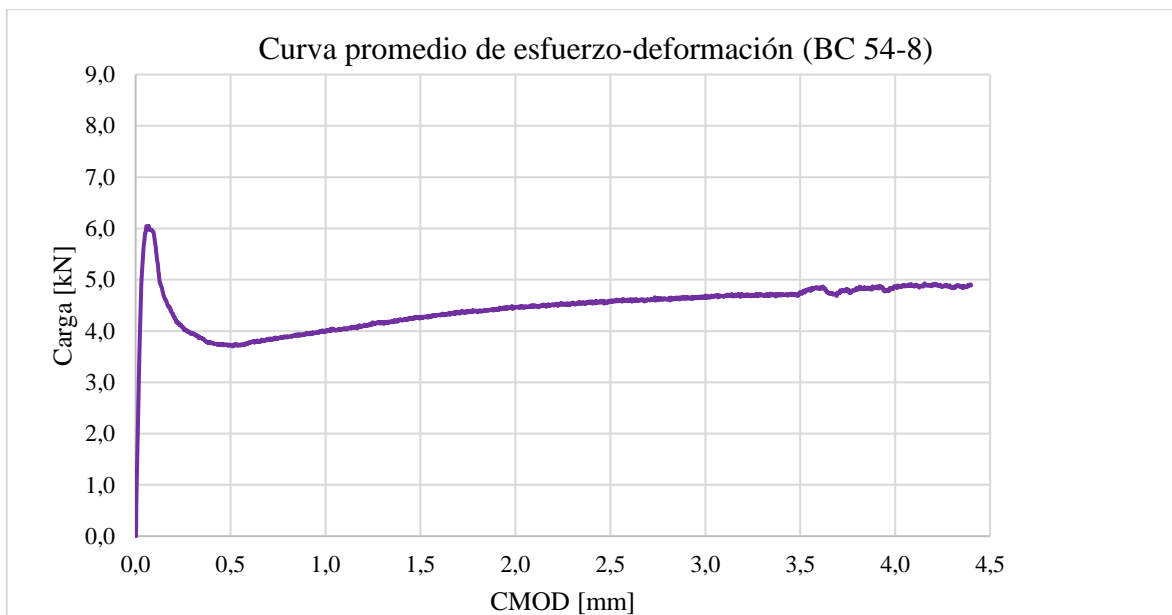


Tabla 5.29 Deformación y valor alcanzado en la carga máxima para probetas BC 54-8

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
1	0,108	5,653
2	0,094	7,509
3	0,052	5,426
<b>Promedio</b>	<b>0,085</b>	<b>6,196</b>

Tabla 5.30 Carga alcanzada en distintos desplazamientos para vigas BC 54-8

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]				
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
1	4,546	4,794	5,107	5,112	4,995
2	3,675	4,047	4,691	5,048	5,127
3	2,952	3,106	3,580	3,821	4,464
<b>Promedio</b>	<b>3,724</b>	<b>3,982</b>	<b>4,459</b>	<b>4,660</b>	<b>4,862</b>

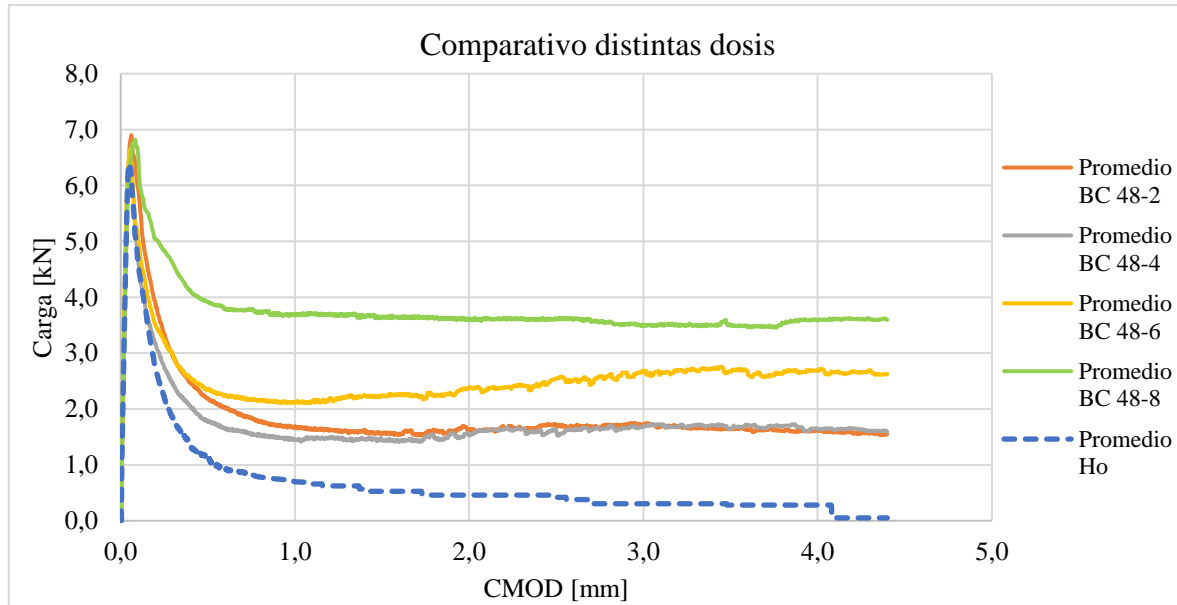
## 5.4 ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO A TRACCIÓN PROPUESTO

A continuación, se presentan comparaciones entre dosificaciones, entre fibras, cálculo de parámetros propuestos y su comparación, y el análisis para y entre fibras.

Para una correcta interpretación y que el análisis no se vea alterado por una percepción distinta, los gráficos a comparar presentan el mismo rango de valores en sus ejes, es decir, se pueden superponer para un análisis visual.

### 5.4.1 Comparación distintas dosis de BC 48

Gráfico 5.14 Comparación entre dosis de BC 48



Del Gráfico 5.14, se observa claramente como las distintas curvas están por encima de la curva de hormigón en masa, es decir, la tenacidad (área bajo la curva) post peak de carga es mayor en presencia de fibra. Además, no sólo están por encima, sino que la tendencia a ir en descenso desaparece y en casos incluso presenta ligeros aumentos en el tiempo o, viéndolo desde otro punto, mientras la apertura de grieta es cada vez mayor.

También, al estar superpuestas las distintas dosis, se observa que, para dosis más grandes, la curva tiende a estar más alta que la anterior. Es decir, a medida que aumenta la cantidad de fibra en la viga, la resistencia de esta, pasado el punto máximo, desciende menos (se aleja menos del máximo alcanzado), lo que se traduce como una mayor tenacidad.

La dosis de 8 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] se aleja claramente del resto, sin embargo, a diferencia de sus pares, no presenta un aumento a medida que la grieta aumenta en tamaño. Por otro lado, las dosis de 2 y 4 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] no presentan diferencias significativas. Finalmente, el comportamiento ideal lo presenta la dosis de 6 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Para mostrar de manera más cuantitativa este aumento en la tenacidad a medida que aumenta la dosis de fibra, se presenta la Tabla 5.31 con los valores de carga para distintos CMOD (algunos de ellos ya mostrados anteriormente) y se muestra la diferencia porcentual entre el mínimo y el máximo.

Tabla 5.31 Comparación de CMOD de las distintas dosis de BC 48

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
BC 48-2	1,684	1,569	1,631	1,685	1,719	1,637	1,611
BC 48-4	1,450	1,435	1,525	1,607	1,686	1,648	1,638
BC 48-6	2,122	2,234	2,390	2,548	2,668	2,681	2,682
BC 48-8	3,676	3,648	3,606	3,598	3,492	3,505	3,585
Diferencia	154%	154%	136%	124%	107%	114%	123%

La escala de colores utilizada asigna tonos verdes más oscuros entre mayor sea el valor de la carga. Se refuerza el hecho de que la dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] presenta los valores más elevados y se observa como la dosis de 6 [kg/m<sup>3</sup>] gradualmente tiene un aumento a diferencia de la de 8 [kg/m<sup>3</sup>] que va en descenso.

También se observa que los valores alcanzados por la dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] superan, en más de un 100%, la carga resistida post agrietamiento por sus símiles de 2 [kg/m<sup>3</sup>].

En cuanto a la resistencia máxima al cizalle, calculada según la Ecuación 2.2 y la Ecuación 2.4, considerando un ancho de 75 [mm] y una altura de 150 [mm] y los valores promedio de resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) obtenidos en la sección 5.1, se presentan los siguientes valores (Tabla 5.32):

Tabla 5.32 Resistencia máxima al cizalle de vigas BC 48

Probeta	$v_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$v_u$ [Mpa]	Diferencia %
HO 00-0	0,875	0,848	3,2
BC 48-2	0,948	0,877	7,5
BC 48-4	0,882	0,937	6,2
BC 48-6	0,911	0,947	4,0
BC 48-8	0,910	0,824	9,5

La diferencia presentada en la Tabla 5.32 corresponde a la del valor propuesto por el ACI ( $v_u$ ) con respecto al teórico utilizado para el análisis en los cursos de diseño ( $v_{m\acute{a}x}$ ). Se observa que los datos son muy cercanos, sobre todo en la viga sin fibra. Esto responde a la idea principal de que la fibra no aporta hasta luego de alcanzada la resistencia máxima del hormigón y, por tanto, no tiene mayor incidencia en este valor, pues las ecuaciones tampoco consideran su aporte.

Utilizando la Ecuación 2.1 para las cargas en los diferentes puntos de interés (CMOD), las resistencias presentadas post agrietamiento (Tabla 5.33), son:

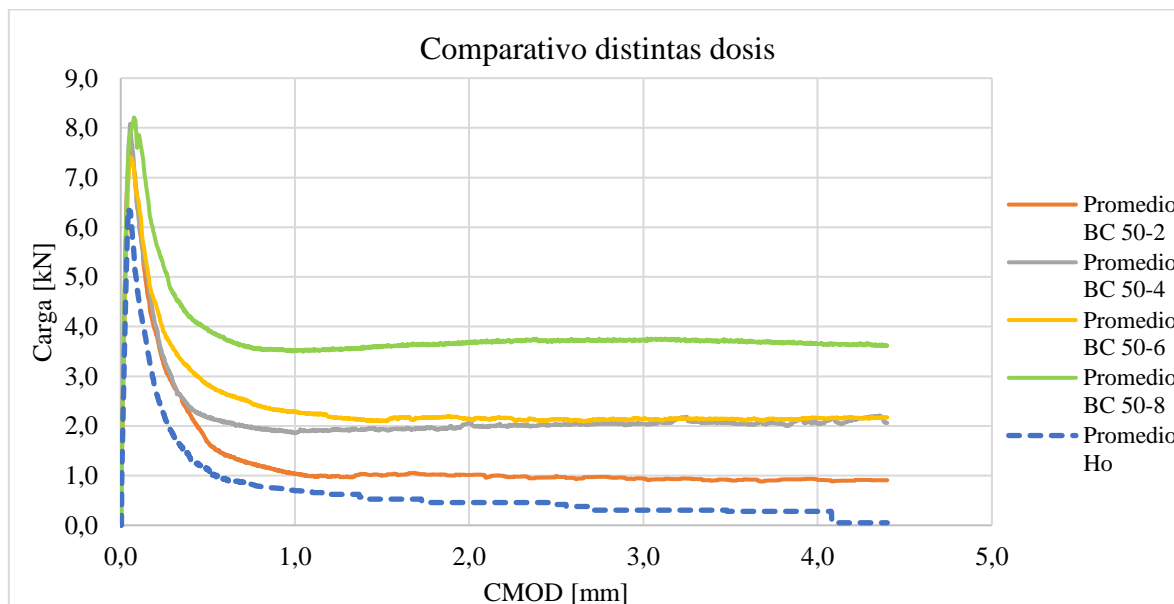
Tabla 5.33 Resistencias al corte en distintos puntos post-agrietamiento de vigas BC 48

Probeta	$v_{prom}$ [Mpa] para distintos CMOD						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
HO 00-0	0,062	0,047	0,041	0,037	0,027	0,025	0,025
BC 48-2	0,150	0,139	0,145	0,150	0,153	0,146	0,143
BC 48-4	0,129	0,128	0,136	0,143	0,150	0,146	0,146
BC 48-6	0,189	0,199	0,212	0,226	0,237	0,238	0,238
BC 48-8	0,327	0,324	0,321	0,320	0,310	0,312	0,319

De los datos se puede determinar que las resistencias al corte post agrietamiento para las distintas fibras van desde un 15 a un 37 % de la resistencia máxima alcanzada por el hormigón por sí solo.

### 5.4.2 Comparación distintas dosis de BC R50

Gráfico 5.15 Comparación entre dosis de BC 50



Al igual que en el caso de la fibra anterior, visualmente se observa lo mismo en el Gráfico 5.15. Las distintas curvas están por encima de la curva de hormigón en masa, es decir, la tenacidad post peak de carga es mayor en presencia de fibra. Además, la tendencia a ir en descenso desaparece y en casos presenta ligeros aumentos a medida que la apertura de grieta es mayor. Es decir, la distancia entre el máximo alcanzado y las resistencias residuales en distintos puntos es menor.

Debido a la superposición de las distintas dosis, es posible observar que, para dosis más grandes, la curva tiende a estar más alta que la anterior, lo que quiere decir que a medida que aumenta la cantidad de fibra en la viga, la resistencia de esta, pasado el punto máximo, desciende menos. Lo que se traduce como una resistencia residual más cercana a la resistencia máxima y también una mayor tenacidad.

La dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] se aleja claramente del resto y además presenta un aumento a medida que la grieta aumenta en tamaño, cosa que solo se puede observar en pequeña medida en la con dosis de 4 [kg/m<sup>3</sup>]. Por otro lado, las dosis de 4 y 6 [kg/m<sup>3</sup>] no presentan diferencias significativas entre ellas.

Para mostrar de manera más cuantitativa este aumento en la tenacidad a medida que aumenta la dosis de fibra, y también el aumento de resistencia a medida que crece la grieta presente en dos de las vigas, se presenta la Tabla 5.34 con los valores de carga para distintos CMOD (algunos de ellos ya mostrados anteriormente) y se muestra la diferencia porcentual entre el mínimo y el máximo.

Tabla 5.34 Comparación de CMOD de las distintas dosis de BC 50

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
BC 50-2	1,044	0,997	1,013	0,990	0,940	0,911	0,914
BC 50-4	1,863	1,937	2,049	2,029	2,046	2,058	2,045
BC 50-6	2,294	2,112	2,155	2,136	2,145	2,140	2,157
BC 50-8	3,508	3,616	3,678	3,704	3,737	3,730	3,654
Diferencia	236%	263%	263%	274%	297%	309%	300%

La escala de colores es igual a la utilizada anteriormente. A través de esta, se refuerza el hecho de que la dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] presenta los valores más elevados y que tiene un leve aumento a diferencia de las demás, que prácticamente se mantienen planas.

También se observa que los valores alcanzados por la dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] superan, en más de un 200%, la carga resistida post agrietamiento por su par de menor dosis (2 [kg/m<sup>3</sup>]). Esto es el doble de lo que presentaba la misma dosis de la fibra BC 48.

En cuanto a la resistencia máxima al cizalle, calculada según las Ecuaciones 2.2 y 2.4, considerando un ancho de 75 [mm] y una altura de 150 [mm] y los valores promedio de resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) obtenidos en la sección 5.1, se presentan los siguientes valores (Tabla 5.35):

Tabla 5.35 Resistencia máxima al cizalle de vigas BC 50

Probeta	$v_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$v_u$ [Mpa]	Diferencia %
HO 00-0	0,875	0,848	3,2%
BC 50-2	1,075	0,907	15,6%
BC 50-4	1,088	0,920	15,5%
BC 50-6	1,022	0,834	18,4%
BC 50-8	1,097	0,961	12,4%

La diferencia se calculó de igual manera que el caso anterior. Se observa que los datos no son tan cercanos, a comparación con la viga sin fibra. Si bien la idea principal es que la fibra no aporta hasta luego de alcanzada la resistencia máxima del hormigón y, por tanto, no tiene mayor incidencia en este valor, pues las ecuaciones tampoco consideran su aporte; aquí se observa una diferencia cercana a un 15%.

Utilizando la Ecuación 2.1 y considerando las cargas en los diferentes puntos de interés (CMOD), las resistencias presentadas post agrietamiento (Tabla 5.36), considerándolo un material homogéneo, son:

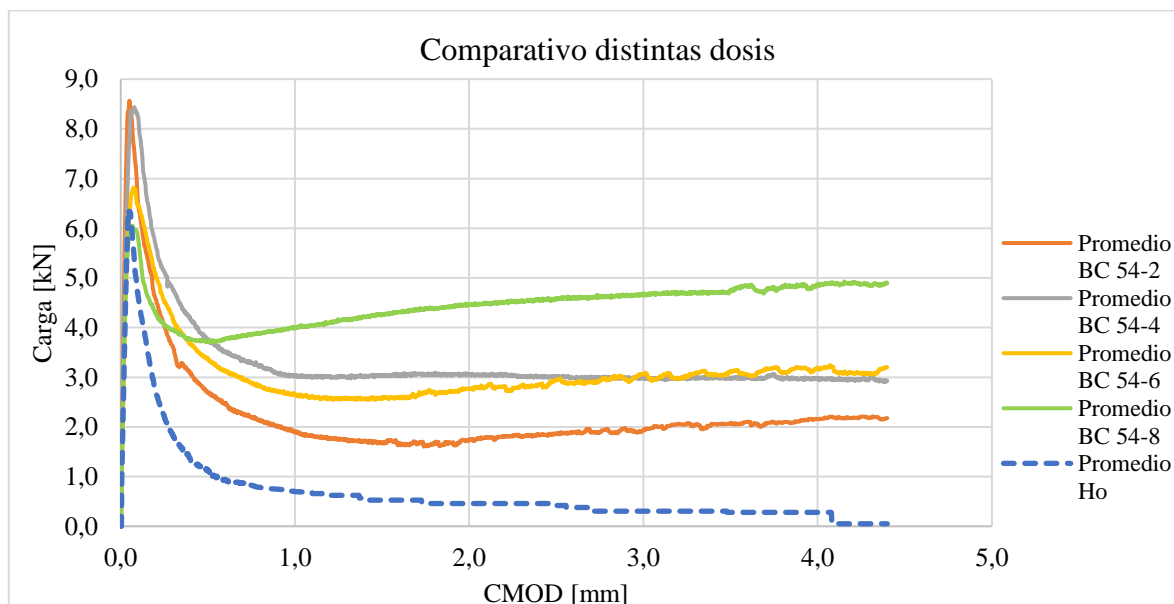
Tabla 5.36 Resistencias al corte en distintos puntos post-agrietamiento de vigas BC 50

Probeta	$v_{prom}$ [Mpa] para distintos CMOD						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
HO 00-0	0,062	0,047	0,041	0,037	0,027	0,025	0,025
BC 50-2	0,093	0,089	0,090	0,088	0,084	0,081	0,081
BC 50-4	0,166	0,172	0,182	0,180	0,182	0,183	0,182
BC 50-6	0,204	0,188	0,192	0,190	0,191	0,190	0,192
BC 50-8	0,312	0,321	0,327	0,329	0,332	0,332	0,325

De los datos se puede determinar que las resistencias al corte post agrietamiento para las distintas fibras se mantienen en un rango de un 9 a un 38 % de la resistencia máxima alcanzada por el hormigón por sí solo.

### 5.4.3 Comparación distintas dosis de BC 54

Gráfico 5.16 Comparación entre dosis de BC 54



Tal como en las fibras anteriores, el Gráfico 5.16 muestra como las distintas curvas promedio están por encima de la curva de hormigón en masa, es decir, la tenacidad post peak de carga es mayor en presencia de fibra. Además, la curva de carga tiene una clara tendencia a crecer a medida que la apertura de grieta es mayor. Es decir, la distancia entre el máximo alcanzado y las resistencias residuales en distintos puntos es menor.

Al estar las curvas superpuestas se ve que a medida que aumenta la cantidad de fibra en la viga, la resistencia de esta, pasado el punto máximo, no solo desciende menos, sino que, pasado un punto, va en aumento. Lo que se traduce como una resistencia residual más cercana a la resistencia máxima y también una mayor tenacidad.

La dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] se aleja claramente del resto y además presenta un aumento a medida que la grieta aumenta en tamaño, cosa que también se observa con las dosis de 2 y 6 [kg/m<sup>3</sup>]. Por otro lado, las dosis de 4 y 6 [kg/m<sup>3</sup>] no presentan diferencias significativas entre ellas. También se observa que a medida que aumenta la cantidad de fibra disminuye el máximo alcanzado, lo que provoca que en el caso de las vigas con dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] el repunte de resistencia residual se acerque bastante al máximo alcanzado por la viga.

Para mostrar de manera más cuantitativa lo observado en el Gráfico 5.16, es decir, el aumento en la tenacidad a medida que aumenta la dosis de fibra, y también el aumento a medida que crece la grieta presenta en dos de las vigas, se presenta la Tabla 5.37 con los valores de carga para distintos CMOD y se muestra la diferencia porcentual entre el mínimo y el máximo.

Tabla 5.37 Comparación de CMOD de las distintas dosis de BC 54

Probeta	Cargas [kN] a distintos CMOD [mm]						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
BC 54-2	1,899	1,665	1,728	1,863	1,924	2,081	2,154
BC 54-4	3,019	3,041	3,051	3,008	2,995	2,993	2,982
BC 54-6	2,652	2,576	2,765	2,945	3,057	3,119	3,192
BC 54-8	3,982	4,261	4,459	4,578	4,660	4,748	4,862
Diferencia	110%	156%	158%	146%	142%	128%	126%

La escala de colores es igual a la utilizada anteriormente. A través de esta, se refuerza el hecho de que la dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] presenta los valores más elevados y que existe una tendencia en aumento en 3 de las cuatro dosis, esta tendencia se observa en el cambio de tonalidad de izquierda a derecha, desde un tono más claro a uno más oscuro. La dosis de 4 [kg/m<sup>3</sup>] es donde no se evidencia dicha tendencia.

En la Tabla 5.37 también se observa que los valores alcanzados por la dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] superan, en más de un 100%, la carga resistida post agrietamiento al valor más bajo presentado por sus pares.

En cuanto a la resistencia máxima al cizalle, calculada según las Ecuaciones 2.2 y 2.4, considerando un ancho de 75 [mm] y una altura de 150 [mm] y los valores promedio de resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) obtenidos en la sección 5.1, se presentan los siguientes valores (Tabla 5.38):

Tabla 5.38 Resistencia máxima al cizalle de vigas BC 54

Probeta	$v_{\text{máx}}$ [MPa]	$v_u$ [Mpa]	Diferencia %
HO 00-0	0,875	0,848	3,2%
BC 54-2	1,173	0,911	22,4%
BC 54-4	1,173	0,929	20,8%
BC 54-6	0,943	1,048	11,1%
BC 54-8	0,826	0,976	18,1%

La diferencia mostrada en la Tabla 5.38 se calculó igual que en los casos anteriores. Se observa que los datos no son tan cercanos, a comparación con la viga sin fibra. Si bien la idea principal es que la fibra no influye hasta luego de alcanzada la resistencia máxima del hormigón y, por tanto, no tiene mayor incidencia en este valor, pues las ecuaciones utilizadas tampoco consideran su aporte; aquí se observa una diferencia superior a un 20% en algunos casos.

Utilizando la Ecuación 2.1 y considerando las cargas en los diferentes puntos de interés (CMOD), las resistencias presentadas post agrietamiento (Tabla 5.39), son:

Tabla 5.39 Resistencias al corte en distintos puntos post-agrietamiento de vigas BC 54

Probeta	$v_{\text{prom}}$ [Mpa] para distintos CMOD						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
HO 00-0	0,062	0,047	0,041	0,037	0,027	0,025	0,025
BC 50-2	0,169	0,148	0,154	0,166	0,171	0,185	0,191
BC 50-4	0,268	0,270	0,271	0,267	0,266	0,266	0,265
BC 50-6	0,236	0,229	0,246	0,262	0,272	0,277	0,284
BC 50-8	0,354	0,379	0,396	0,407	0,414	0,422	0,432

De los datos se puede determinar que las resistencias al corte post agrietamiento para las distintas fibras se mantienen en un rango de un 17 a un 49 % de la resistencia máxima alcanzada por el hormigón por sí solo.

#### 5.4.4 Comparación distintas fibras en dosis iguales

En esta sección se compara y analiza los resultados de las vigas de igual dosificación, pero de distinto tipo de fibra, es decir, se compara por ejemplo la dosificación de 2 [kg/m<sup>3</sup>] para las fibras BC 48, R50 y 54; y así para las distintas dosis.

Gráfico 5.17 Comparación dosis de 2 kg/m<sup>3</sup> para las distintas fibras

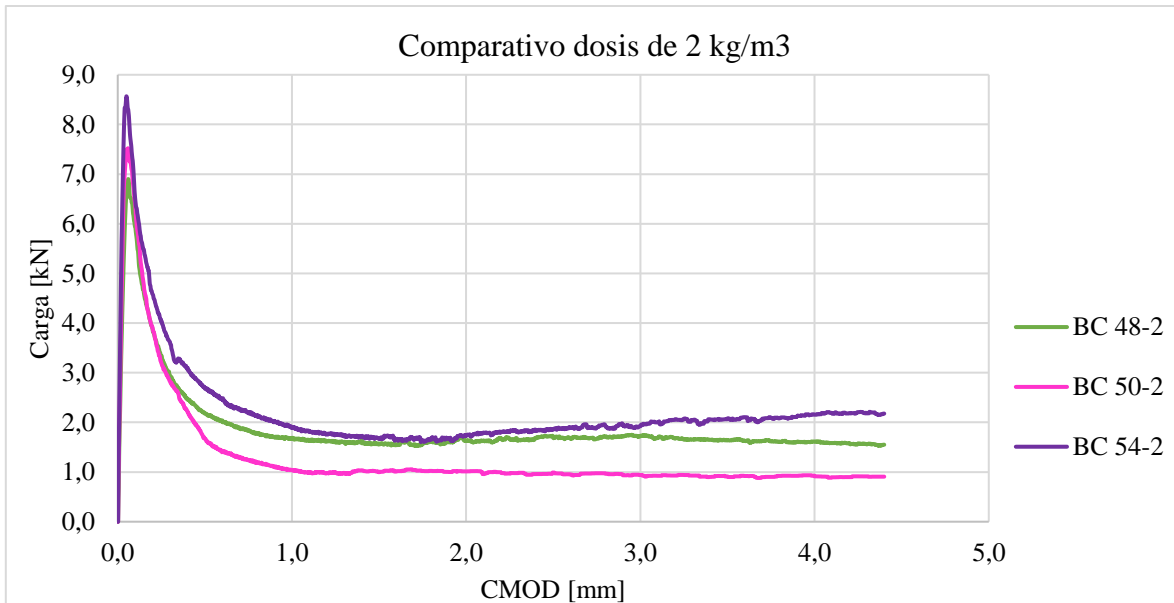


Gráfico 5.18 Comparación dosis de 4 kg/m<sup>3</sup> para las distintas fibras

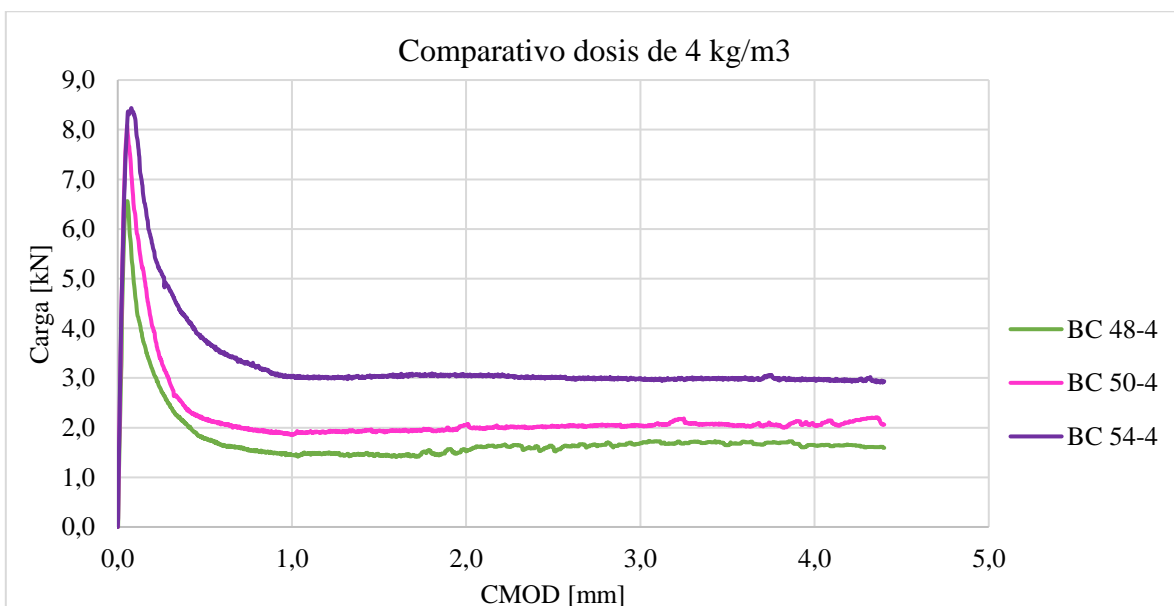


Gráfico 5.19 Comparación dosis de 6 kg/m<sup>3</sup> para las distintas fibras

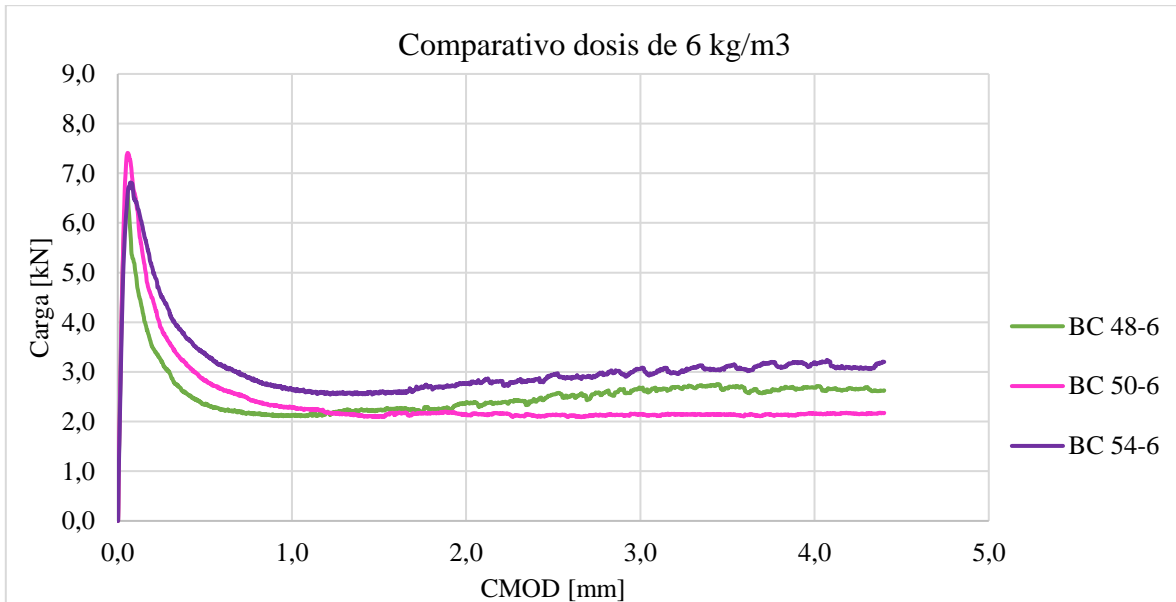
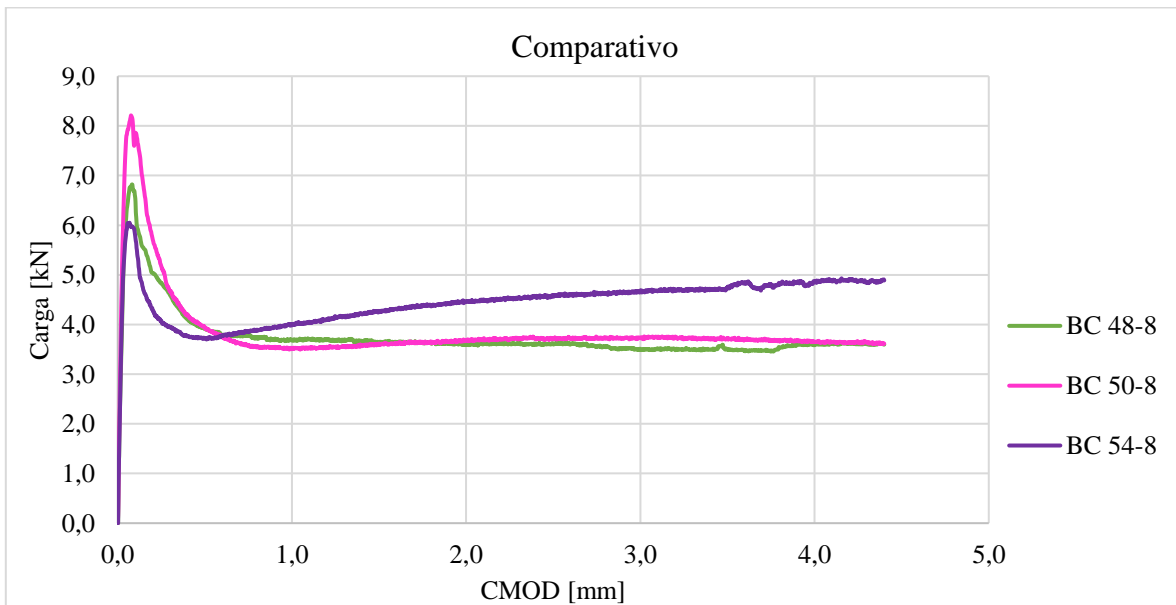


Gráfico 5.20 Comparación dosis de 8 kg/m<sup>3</sup> para las distintas fibras



En los Gráficos 5.17, 5.18, 5.19 y 5.20 se observa que fibra BC 54 siempre entrega valores de carga superiores a lo largo de la zona post agrietamiento, donde la curva siempre está por encima de las demás. En cuanto a las fibras BC 48 y BC R50 no hay mayores diferencias, se asemejan y no hay una supremacía marcada entre ellas. Además, para los gráficos 5.17, 5.19 y 5.20, es decir, dosis de 2,6 y 8 [kg/m<sup>3</sup>], se observa un aumento de la carga a medida que aumenta la apertura. Esto también se puede observar al analizar la Tabla 5.40. Este aumento, refleja la condición más óptima y esperada para el ensayo, donde se observa que la fibra comienza a actuar, dada una buena orientación, la cantidad y la capacidad de carga de la misma.

Recopilando los datos entregados en secciones anteriores, se presenta la Tabla 5.40.

Tabla 5.40 Comparación cruzada de cargas máximas

Probeta	Carga máxima	
	CMOD [mm]	Carga [kN]
BC 48-2	0,070	7,111
BC 50-2	0,057	8,064
BC 54-2	0,049	8,798
BC 48-4	0,055	6,615
BC 50-4	0,053	8,163
BC 54-4	0,075	8,799
BC 48-6	0,055	6,829
BC 50-6	0,063	7,668
BC 54-6	0,076	7,073
BC 48-8	0,083	6,828
BC 50-8	0,087	8,229
BC 54-8	0,085	6,196

De la Tabla 5.40 se puede extraer que las vigas con fibra BC 54 son las que disminuyen en mayor parte su resistencia máxima al alcanzar una cantidad de fibra de 8 [kg/m<sup>3</sup>]. Además, el CMOD donde se producen los peaks, es similar entre las diferentes fibras, encontrándose en un rango de 0,05 a 0,09 [mm].

#### 5.4.5 De los ángulos medidos y su dispersión

Dentro de la literatura estudiada, se encuentra que la dispersión del ángulo que toma la grieta, para un ensayo similar realizado por Jenq y Shah (1995), es considerable. A continuación, se presentan en la Tabla 5.41 los ángulos obtenidos:

Tabla 5.41 Ángulos de grietas

Identificador	Ángulo promedio (°)	Desviación std.	C.V %
HO 00-0	20,98	7,77	37%
BC 48-2	28,49	4,29	15%
BC 48-4	32,68	9,85	30%
BC 48-6	30,08	4,17	14%
BC 48-8	35,61	4,43	12%
BC 50-2	25,32	5,75	23%
BC 50-4	28,96	4,80	17%
BC 50-6	33,43	6,25	19%
BC 50-8	33,69	7,39	22%
BC 54-2	28,23	7,52	27%
BC 54-4	37,50	14,80	39%
BC 54-6	26,57	3,36	13%
BC 54-8	32,51	7,48	23%

Se observa que los ángulos promedios están entre 20 y 40 grados, pero se debe tener en cuenta la desviación, lo que hace posible que incluso haya vigas con ángulos en y sobre los 45°, como también algunos muy rectos cercanos a los 15°. Estos ángulos están medidos con respecto a la vertical como se muestra en el Anexo, en la Ilustración 7.1.

#### 5.4.6 Comparación resistencia a la tracción medida versus tracción por hendimiento

Al comparar los resultados presentados en las Tablas 5.32, 5.33, 5.35, 5.36, 5.38 y 5.39 con los obtenidos en la sección 5.2 y mostrados en la Tabla 5.4; se puede observar que no hay similitud aparente entre ellos. Para ver esto, la Tabla 5.42 muestra un resumen de los datos mencionados.

Tabla 5.42 Resumen comparativo resistencias a la tracción

Ítem	Identificado r	T [MPa]	$v_{m\acute{a}x}$ [Mpa]	$v_{3mm}$ [Mpa]	v vs T	$v_{3mm}$ vs T
1	HO-00-0	2,285	0,875	0,027	38,29%	1,18%
2						
3	BC 48-2	2,977	0,948	0,153	31,85%	5,14%
4						
5	BC 48-4	2,699	0,882	0,150	32,68%	5,56%
6						
7	BC 48-6	3,041	0,911	0,237	29,96%	7,79%
8						
9	BC 48-8	3,077	0,910	0,310	29,57%	10,07%
10						
11	BC 50-2	3,508	1,075	0,084	30,65%	2,39%
12						
13	BC 50-4	3,272	1,088	0,182	33,26%	5,56%
14						
15	BC 50-6	2,737	1,022	0,191	37,33%	6,98%
16						
17	BC 50-8	3,835	1,097	0,332	28,61%	8,66%
18						
19	BC 54-2	2,782	1,173	0,171	42,16%	6,15%
20						
21	BC 54-4	2,868	1,173	0,266	40,89%	9,27%
22						
23	BC 54-6	3,690	0,943	0,277	25,55%	7,51%
24						
25	BC 54-8	3,373	0,826	0,422	24,49%	12,51%
26						

Las pruebas de hendimiento y flexión, más típicos para determinar la resistencia a tracción del hormigón, a menudo presentan valores mayores (Neville & Brooks, 1987). Además, estos valores tienden a diferir entre si y depende del tamaño y dimensiones de las probetas (Olufunke, 2014). Esto es exactamente lo representado en la Tabla 5.42, donde se observa que las resistencias al corte calculadas para las cargas máximas entregan valores entre un 25 y un 40% del valor que entrega el ensayo de hendimiento. Mientras que la resistencia al corte, calculada para un CMOD de 3 [mm] (post agrietamiento) responde a valores menores al 10% de los entregados por el ensayo de tracción indirecta.

## 6 CONCLUSIONES

---

Se concluye en base de los resultados expuestos en la sección 5 (Resultados y análisis de datos). Esta conclusión responde a los objetivos acordados con tal de caracterizar las mezclas de hormigón con fibra presentadas durante toda esta memoria.

En primer lugar, respecto al ensayo propuesto, se logró implementar un ensayo acorde para la investigación. No se presentaron variaciones significativas durante los ensayos, lo que refuerza la idea de que tanto las dimensiones como la carga ajustada a velocidades de apertura de grieta fueron las idóneas. También se logró el objetivo fundamental de generar tracción diagonal, puesto que la entalla dio el pie a generar curvas con inclinaciones, respecto al eje vertical, de aproximadamente 30 grados para todas las probetas con contenido de fibra. Resultado presentado en la Tabla 5.41. Considerar para esto que también se probó otras configuraciones de medidas de vigas y velocidades que presentaron datos incongruentes o falla no deseadas. Dos de estos resultados son expuestos en Anexos, el Gráfico 7.26 donde se observa una viga con entalla más pequeña y mayores dimensiones que falló tan solo alcanzar los 0,05 [mm] aproximadamente y el Gráfico 7.27 que muestra una viga con refuerzo de fibra de carbono (FC) externo que nunca acabó por fallar debido a la alta resistencia de esta fibra, sin embargo, la matriz de hormigón estaba totalmente rota y la FC junto con el epóxico estaban resistiendo por sí solos toda la carga.

De los hormigones en masa, tanto en sus formas cilíndricas, sometidas a compresión y hendimiento, como de las vigas sometidas a tracción diagonal, se concluye que presentan el comportamiento esperado. En el caso del ensayo a compresión, los resultados presentados en la Tabla 5.1 muestran que el hormigón en masa es el que presenta menor variación.

De los hormigones con fibra se concluye con respecto a sus probetas que la confección de estas y su preparación, correcta o no, puede hacer que los resultados presenten ciertas variaciones. Visualmente, durante la campaña experimental se observó vigas con zonas con fibra amontonada y/o en direcciones paralelas al plano de corte, sobre todo en las vigas con mayor cantidad de fibra. Algunos, de estos casos presentaron menores resistencias debido a la disposición de la fibra, aunque cabe destacar que la disposición y distribución no es parte del alcance de la presente memoria. Esto se observa en la fibra BarChip54, la cual además presenta un mayor tamaño que sus pares. En el Gráfico 5.16 se observa, como aun cuando la resistencia máxima siempre es mayor que la del hormigón por sí solo, está va en disminución a medida que aumenta la cantidad de fibra. Se concluye por tanto que a mayor cantidad de fibra no solo la trabajabilidad, como se sabe, es menor, sino que una distribución correcta de las fibras es más difícil de lograr debido a la mayor cantidad y al mayor tamaño.

De lo anterior, junto con las dosis recomendadas, presentadas en la Tabla 2.1 se concluye que las dosis recomendadas son bastante conservadoras. En los 3 casos se supera el límite recomendado, obteniendo buenos resultados. De hecho, en todos los casos la dosis con 8 [kg/m<sup>3</sup>] presenta los mejores resultados. Sin embargo, destacar que, debido a lo mencionado respecto a la trabajabilidad, es recomendable usar dosis menores, dependiendo de lo que se requiera.

Además, para cualquier efecto de resistencia residual, post máximo de carga alcanzado, la fibra BarChip54 es la que otorga mejores resultados sin dudas. Además, sus pares 48 y R50 muestran cierta irregularidad en las dosis intermedias, posiblemente debido a la distribución. La BarChip54 también entrega resistencias máximas alcanzadas mayores a sus pares para dosis de entre 2 y 4 [kg/m<sup>3</sup>], lo que refuerza que es la mejor fibra para aportar resistencia al hormigón de las 3 estudiadas.

El hecho de que la fibra BarChipR50 sea de material reciclado no afecta en su capacidad de aporte según los datos, por lo que el hecho de ser reciclado solo es un aporte ambiental de importancia.

Se llega a la conclusión que las fibras 48 y R50 tienen comportamientos muy cercanos según lo observado en el Gráfico 5.18 y el Gráfico 5.20 debido a que sus dimensiones y características solo difieren en el tipo de material. Aunque la pequeña diferencia de resistencia de la R50 podría explicar porqué la 48 pasa en algunas comparaciones. Mientras que la fibra 54 presenta mejores resultados explicados por su mayor largo, lo que otorga mayor área y longitud de anclaje de la fibra en la matriz.

Teniendo en cuenta que la propiedad más importante de la fibra dentro de la matriz es la de otorgar la capacidad de aumentar significativamente la tenacidad del material compuesto, es decir, de seguir absorbiendo energía posterior a la falla, conduciendo así a una falla dúctil a diferencia de una matriz de hormigón simple. Esto es observable en todas y cada una de las fibras y dosis presentadas.

Se observa que las 3 fibras estudiadas en sus diferentes dosis, posterior al agrietamiento, logran entregar resistencias al corte a lo menos del 10% del máximo alcanzado por el hormigón. De hecho, una interpretación más correcta sería decir que para dosis iguales o mayores a 4 [kg/m<sup>3</sup>] se alcanza posterior a la falla, al menos un 20% de la resistencia propia del hormigón. Sin embargo, para las dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] este comportamiento es aún mejor, entregando en todos los casos resistencias post-peak de al menos un 35% de la resistencia máxima del hormigón en masa y llegando incluso a un 50% de la misma. Es decir, hormigones con dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] de cualquiera de estas fibras, son capaces de seguir deformándose sin colapsar aun con un tercio de la carga máxima que produjo la falla. Un resultado óptimo en caso de sismos, más aun considerando que son hormigones sin refuerzo de acero. Lo que abre una puerta a utilizarlos de esta manera para ciertas estructuras.

De los datos entregados en la Sección 5.4.4, también se puede reforzar la conclusión de la existencia de una proporcionalidad directa entre una mayor cantidad de fibra y la mayor resistencia al corte post agrietamiento, como también la de que a una mayor cantidad de fibra existe una mayor resistencia previo al agrietamiento. Solo la fibra 54 presenta incongruencia respecto a lo último, lo cual es atribuible, como se mencionó, a su tamaño, mayor dosis de la recomendada y a la preparación debido a la mayor complejidad en la trabajabilidad.

Además, en las 3 fibras, aumentar de 2 a 8 [kg/m<sup>3</sup>] significa más de un 100% de aumento en las resistencias post agrietamiento. Llegando incluso en casos a más de un 200%. Sin embargo, de acuerdo a estos mismos datos, se concluye que la dosis de entre 2 y 4 [kg/m<sup>3</sup>] son las menos recomendadas, siendo una dosis entre 4 y 8 [kg/m<sup>3</sup>] las óptimas a utilizar. Esto, coincide en parte con la recomendación del fabricante, donde ninguna fibra recomienda utilizarla en dosis iguales a 2 [kg/m<sup>3</sup>].

Por tanto, se tiene para todas las fibras que, a mayor dosis, mayor resistencia. Como también que fibras iguales en tamaño entregan resultados similares. Las diferencias entre fibra son significativas solo al comparar la BarChip54, la cual supera ampliamente a las demás. También se concluye de los datos entregados para cada fibra respecto a su carga máxima, que la fibra sí aporta cierta resistencia previo al agrietamiento puesto que, en todos los casos, a excepción del de BarChip54 en dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>] es así, donde prácticamente la resistencia aumenta entre un 10 a un 30%, observable en gráficos comparativos. Lo mismo es aplicable entre tipos de fibra, para la BarChip 48 y R50, donde está última siempre supera a su par de manera notoria en la carga máxima admitida.

Con respecto a la grieta, esta es capaz de aumentar su tamaño a un ancho totalmente visible sin que las fibras pierdan capacidad, incluso el comportamiento elastoplástico se ve notoriamente en los casos de dosis de 8 [kg/m<sup>3</sup>]. Sin embargo, visualmente se observó durante los ensayos como algunas fibras se desprendían de la matriz.

Además, también en cuanto a la grieta, se observa en la Tabla 5.41 que los ángulos promedio con respecto al eje vertical varían entre 28 y 38 grados, con dispersiones bajas entre las probetas. Esto quiere decir, como se observa en la Tabla 7.1 de Anexos, que los ángulos alcanzan en casos los 45 grados esperados. La única dosis que sale de los márgenes es la BarChip54 de 4 [kg/m<sup>3</sup>], cuya dispersión es de casi el 15%, posiblemente debido a errores de medición y preparación. Esta dispersión también es similar entre fibras, por lo que a diferencia de lo descrito por Shah et al. (1995), la dispersión se considera baja, dando fiabilidad al ensayo.

Para terminar, como ejercicio extra se comparó la resistencia a la tracción entregada por el ensayo de hendimiento, con la resistencia al corte producto de tracción diagonal, datos mostrados en la Tabla 5.42, donde se observa que la tracción por hendimiento no es un buen indicador para la resistencia a tracción diagonal. Recordar que el ensayo de tracción en cilindros es para determinar un parámetro mayormente utilizado para diseño de losas y pavimentos y no de elementos como vigas.

## 7 ANEXOS

### 7.1 CURVAS INDIVIDUALES AGRUPADAS

Gráfico 7.1 Curvas esf.- def- de las distintas vigas de Ho. en masa

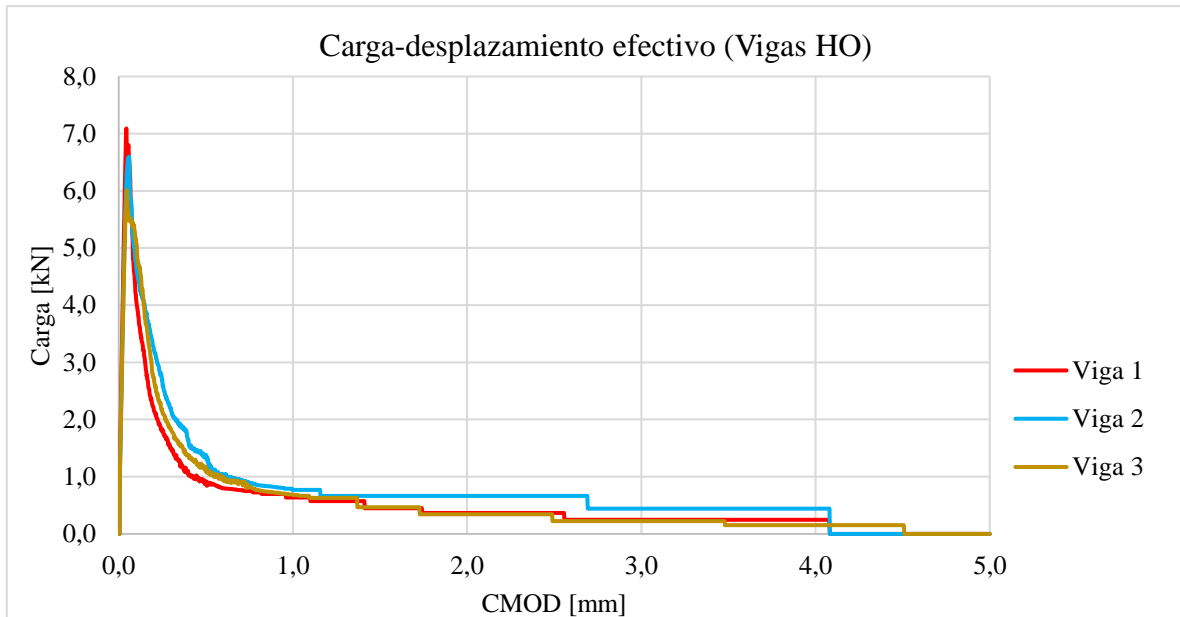


Gráfico 7.2 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-2

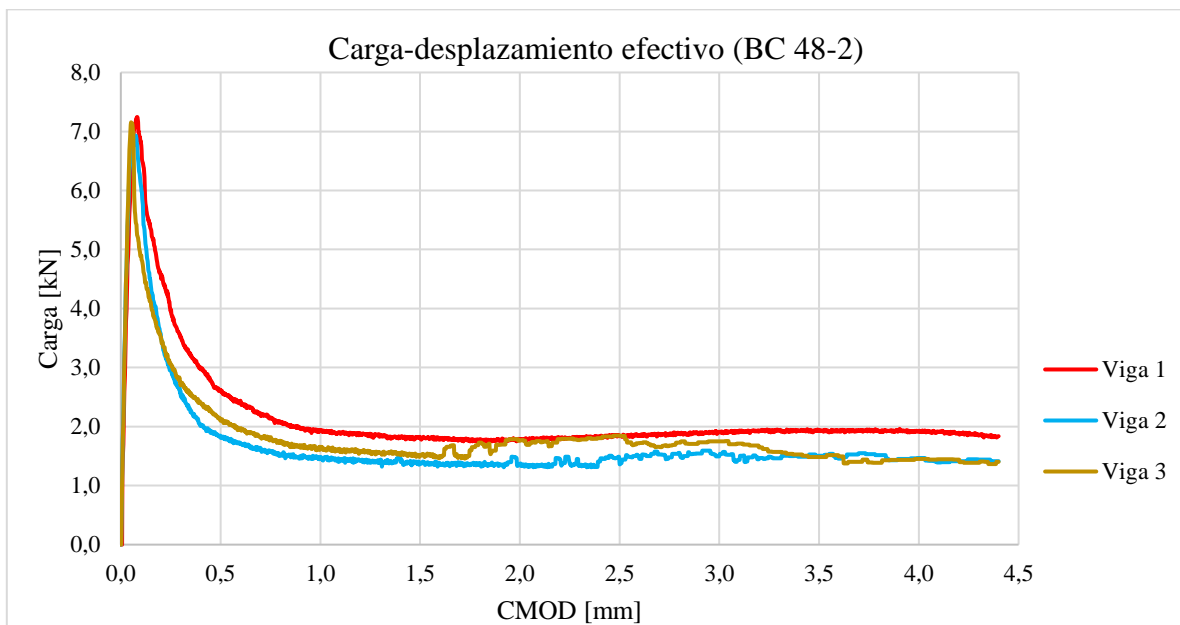


Gráfico 7.3 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-4

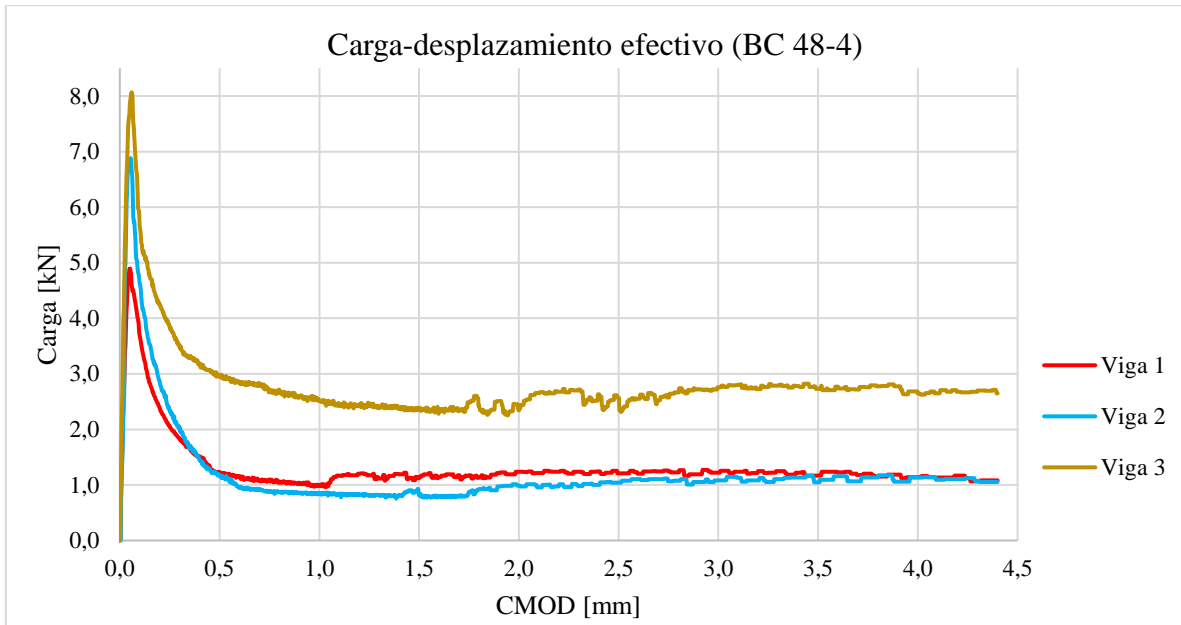


Gráfico 7.4 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-6

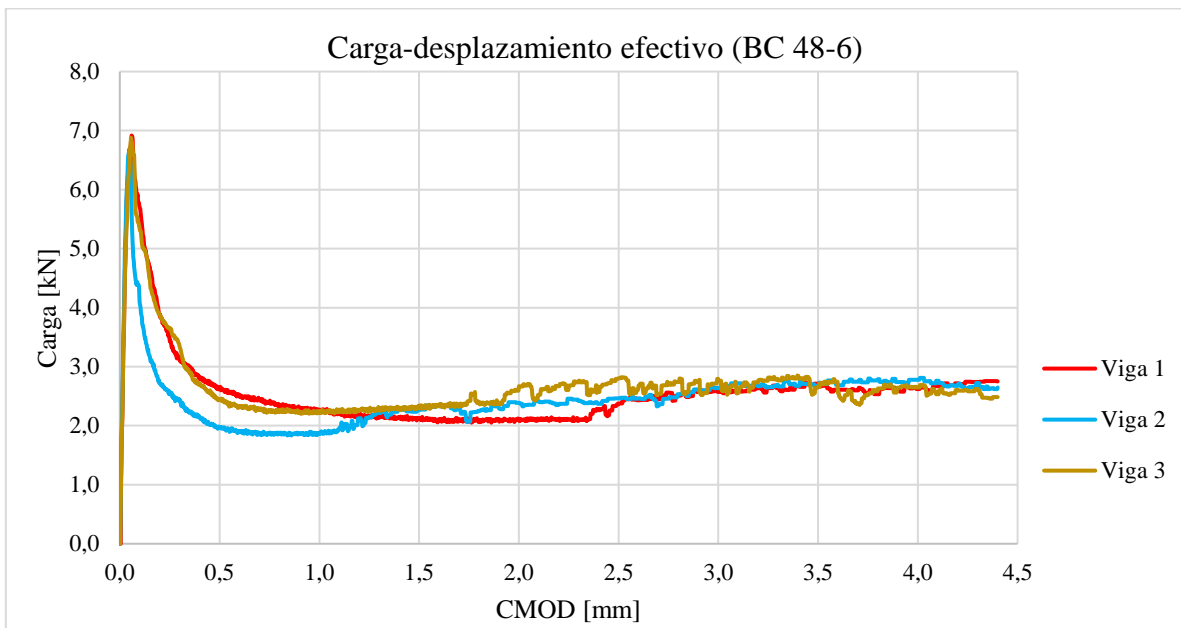


Gráfico 7.5 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 48-8

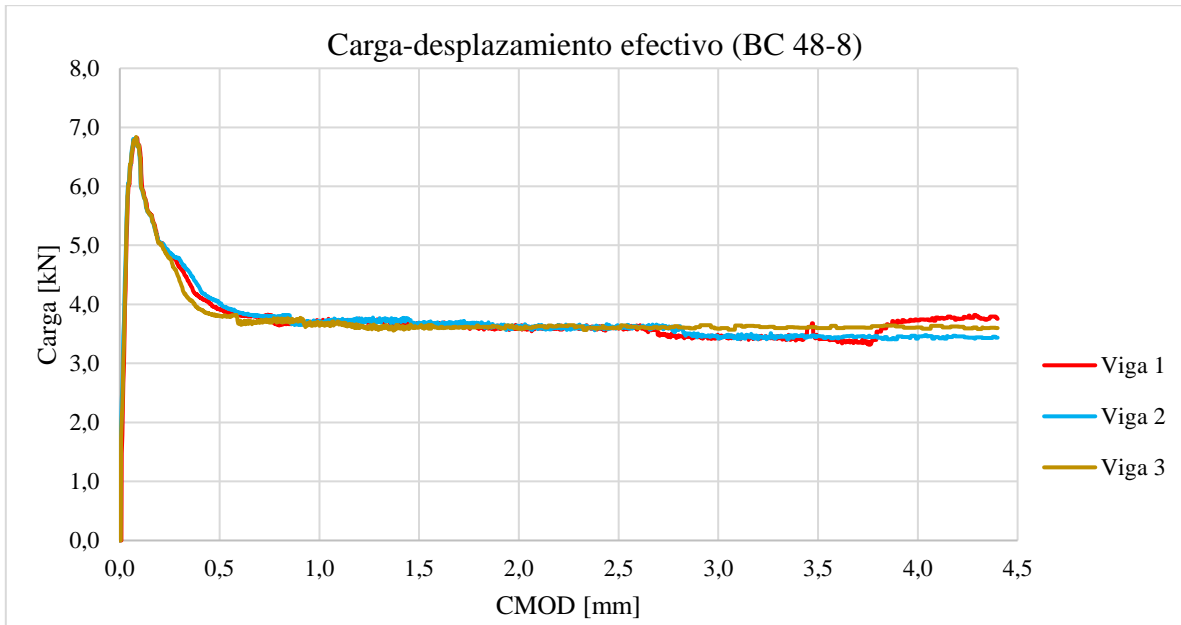


Gráfico 7.6 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-2

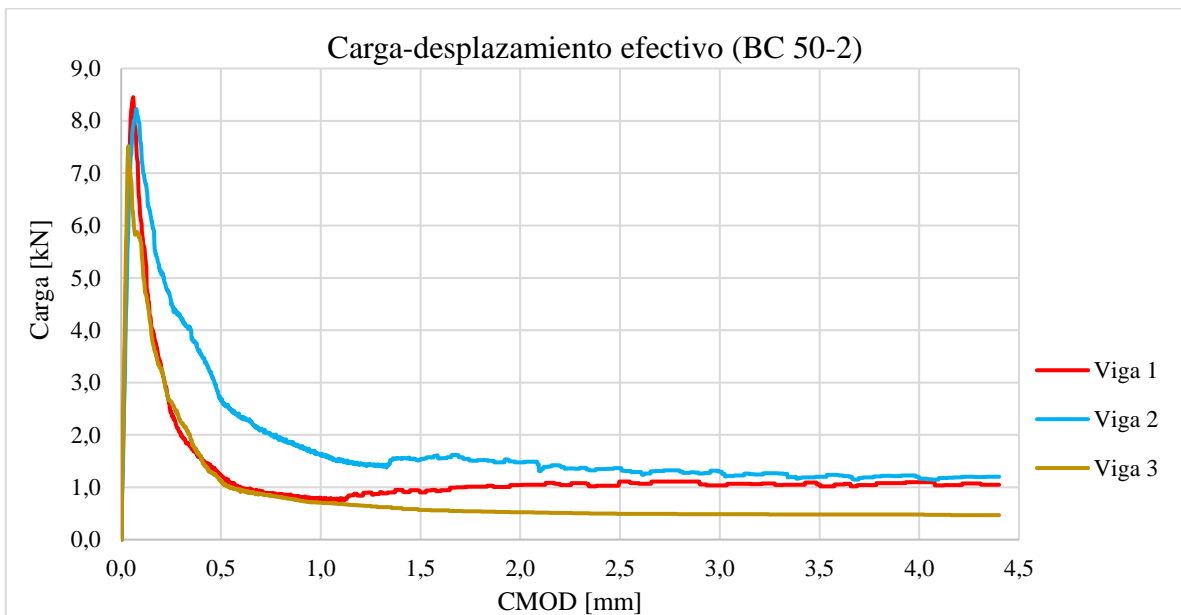


Gráfico 7.7 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-4

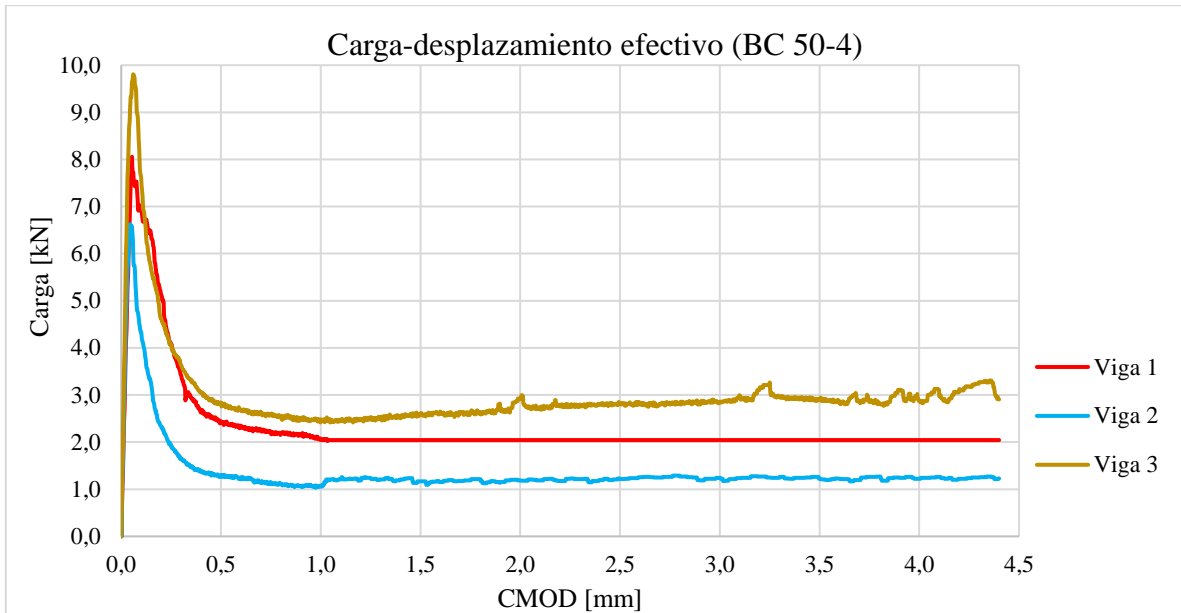


Gráfico 7.8 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-6

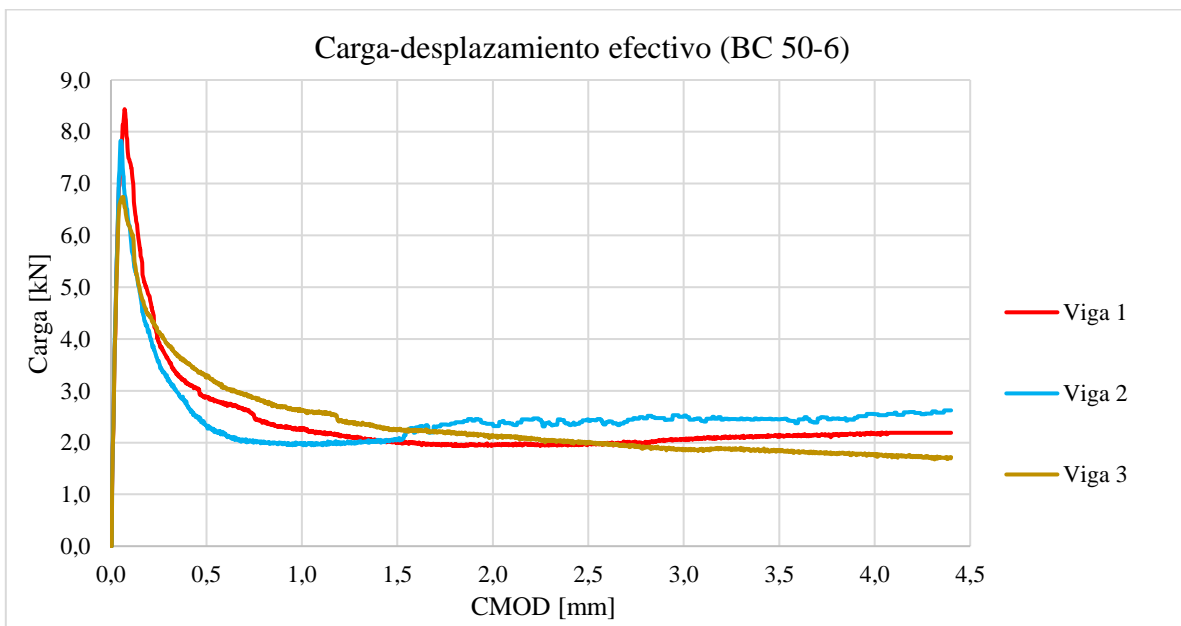


Gráfico 7.9 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 50-8

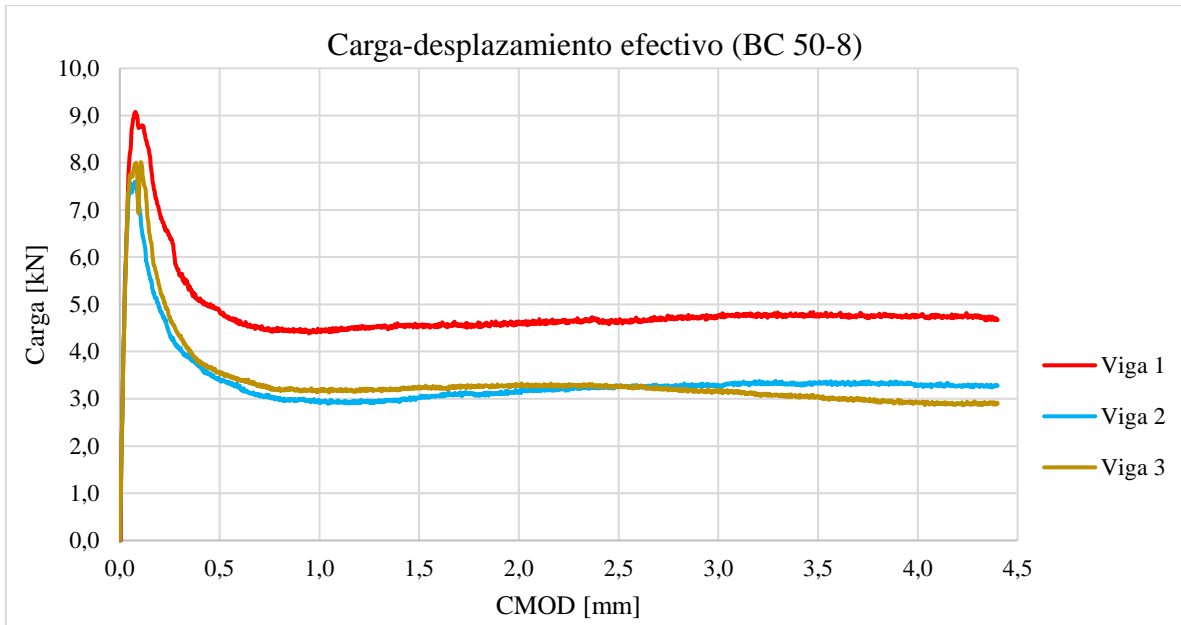


Gráfico 7.10 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-2

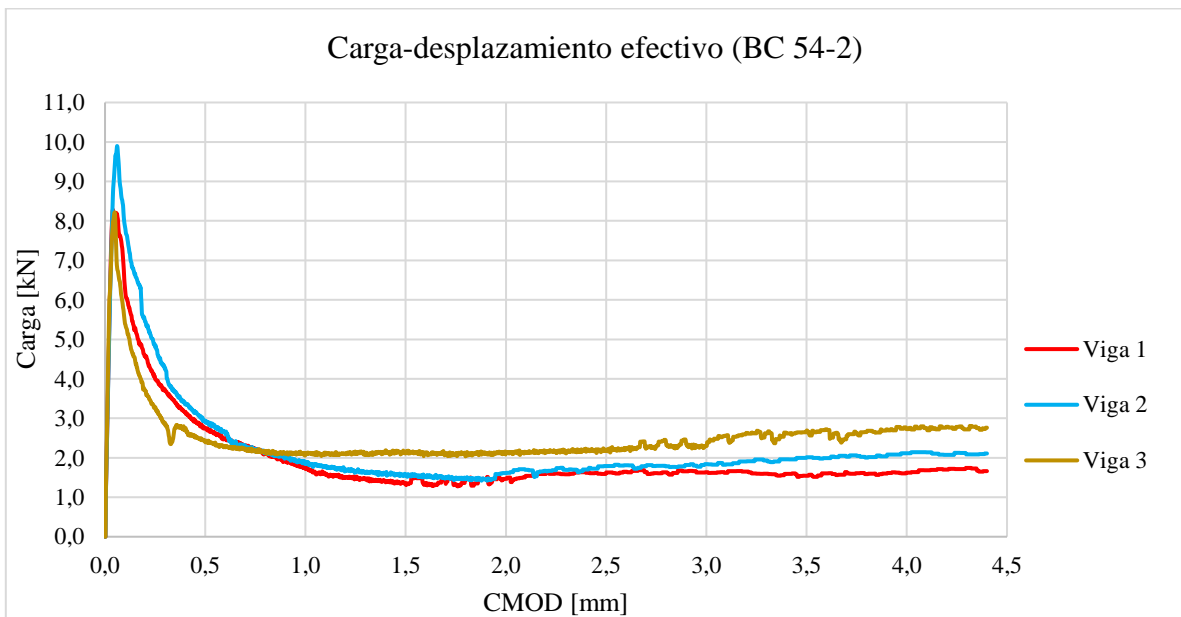


Gráfico 7.11 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-4

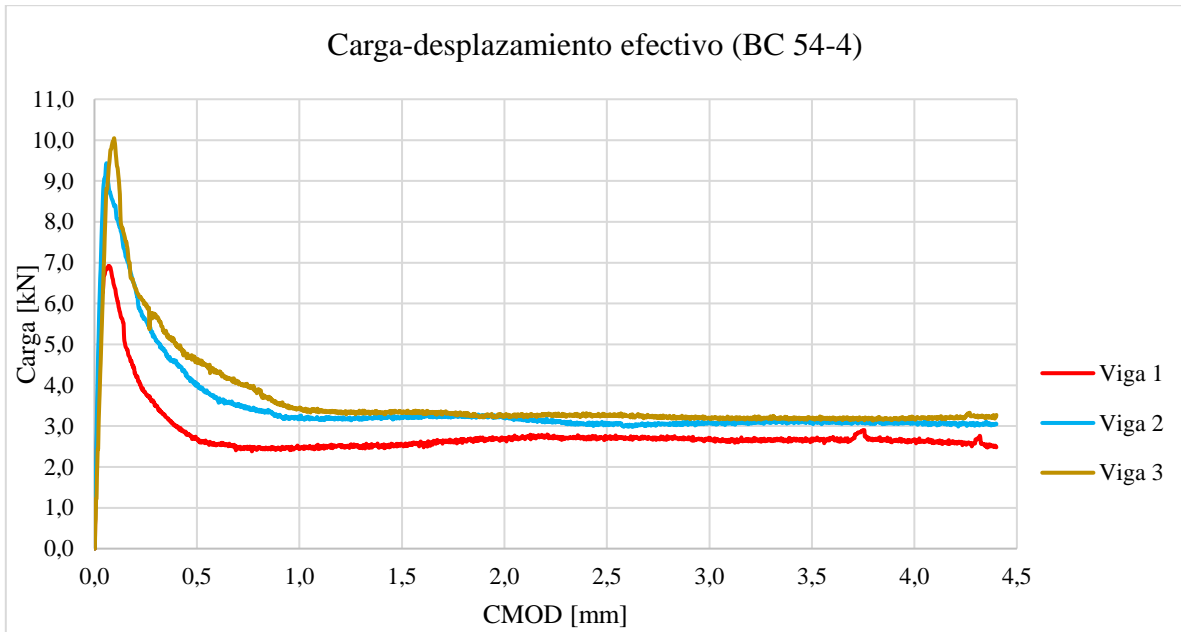


Gráfico 7.12 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-6

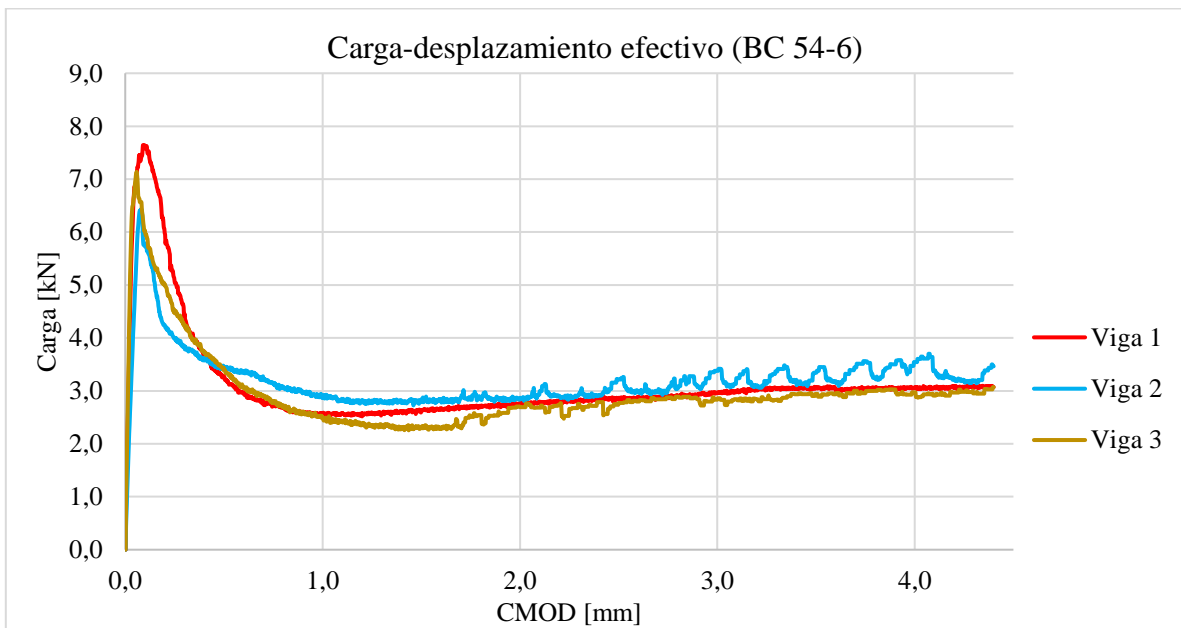
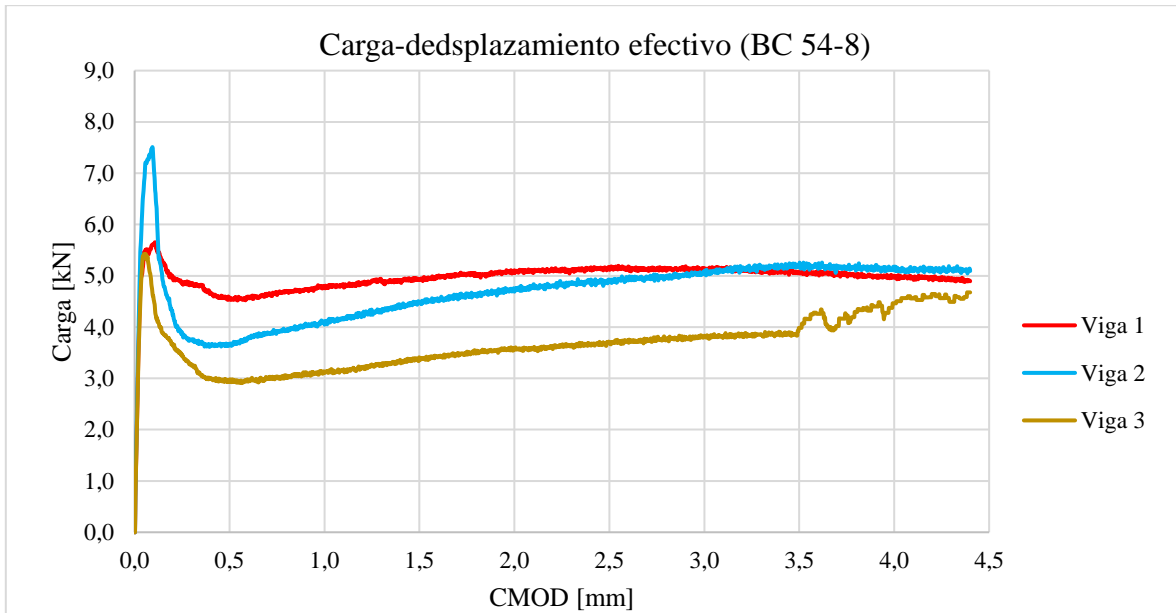


Gráfico 7.13 Curvas esf.- def- de las distintas vigas BC 54-8



## 7.2 COMPARACIONES INDIVIDUALES

Gráfico 7.14 Comparación BC 48-2 versus Ho

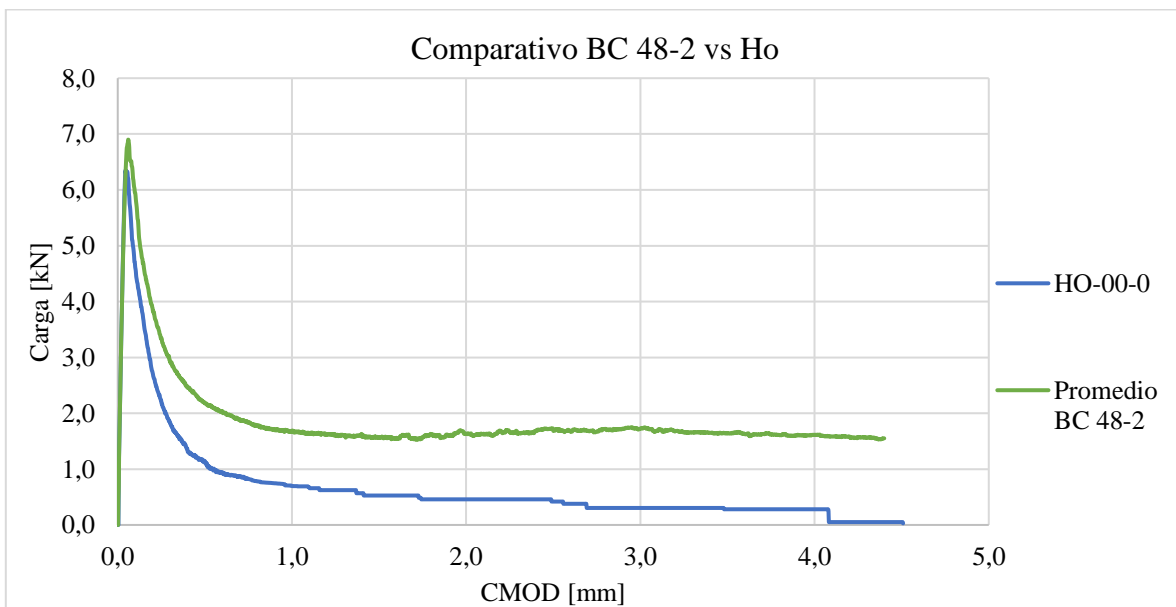


Gráfico 7.15 Comparación BC 48-4 versus Ho

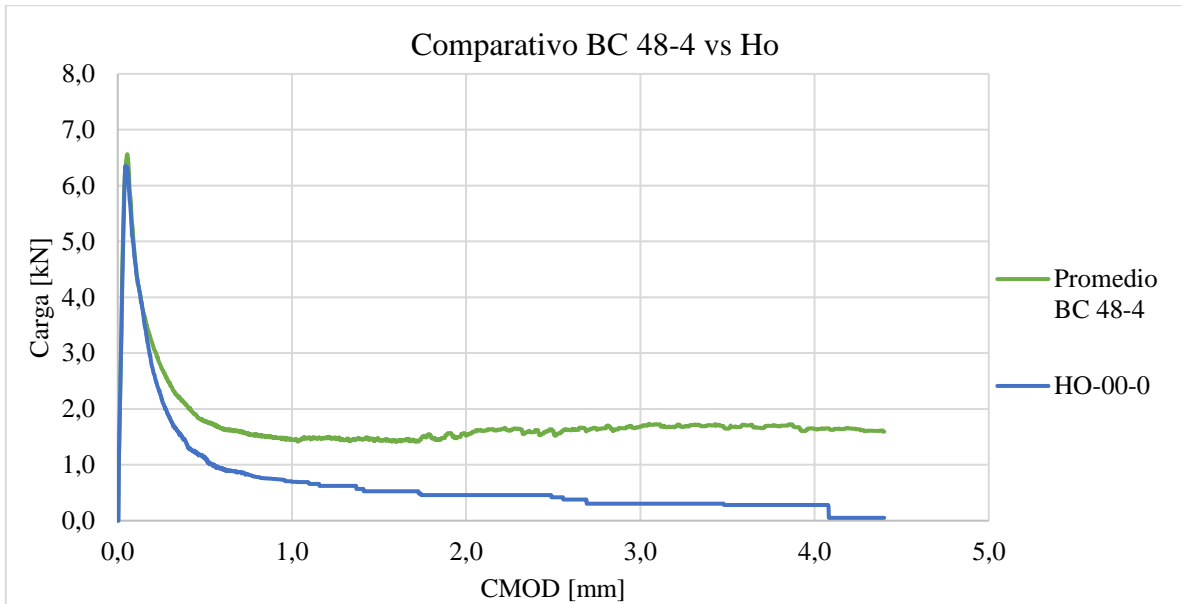


Gráfico 7.16 Comparación BC 48-6 versus Ho

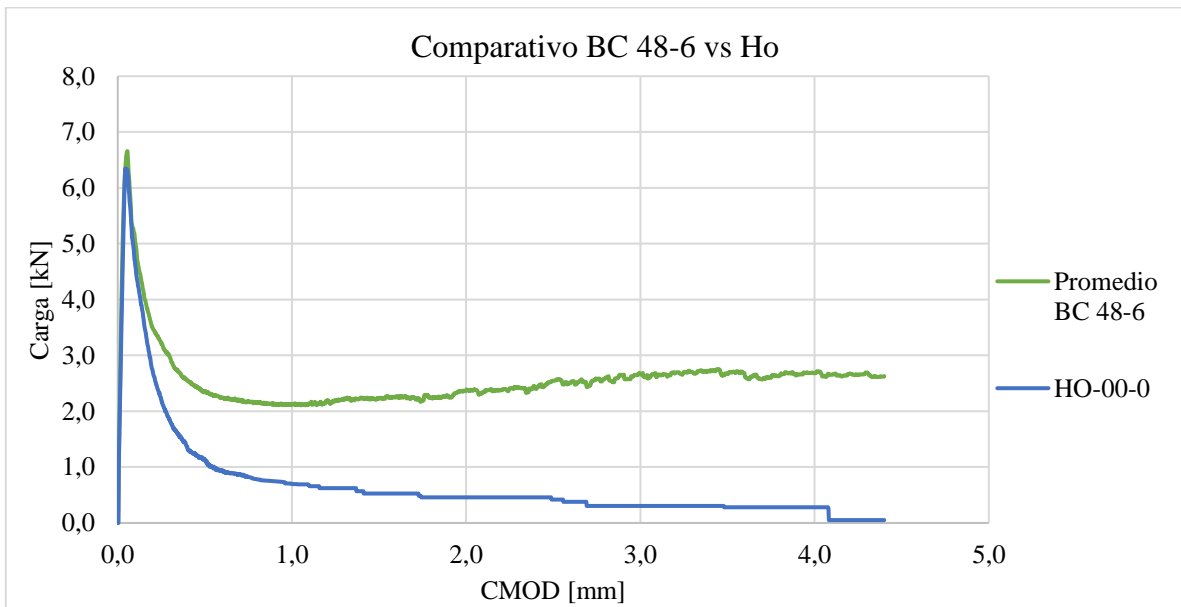


Gráfico 7.17 Comparación BC 48-8 versus Ho

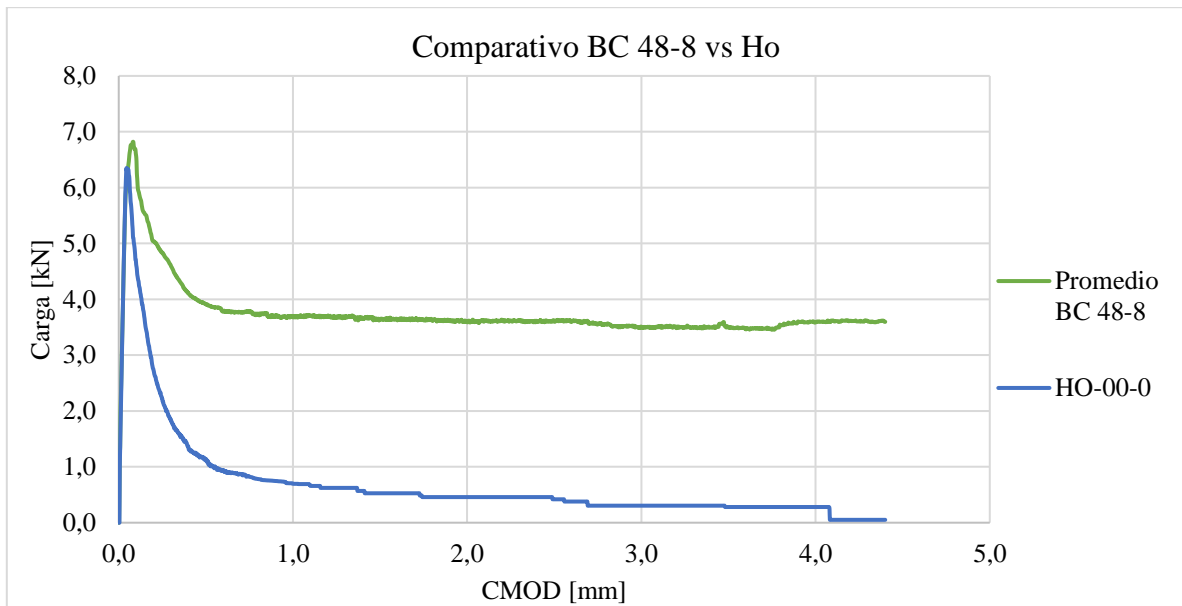


Gráfico 7.18 Comparación BC 50-2 versus Ho

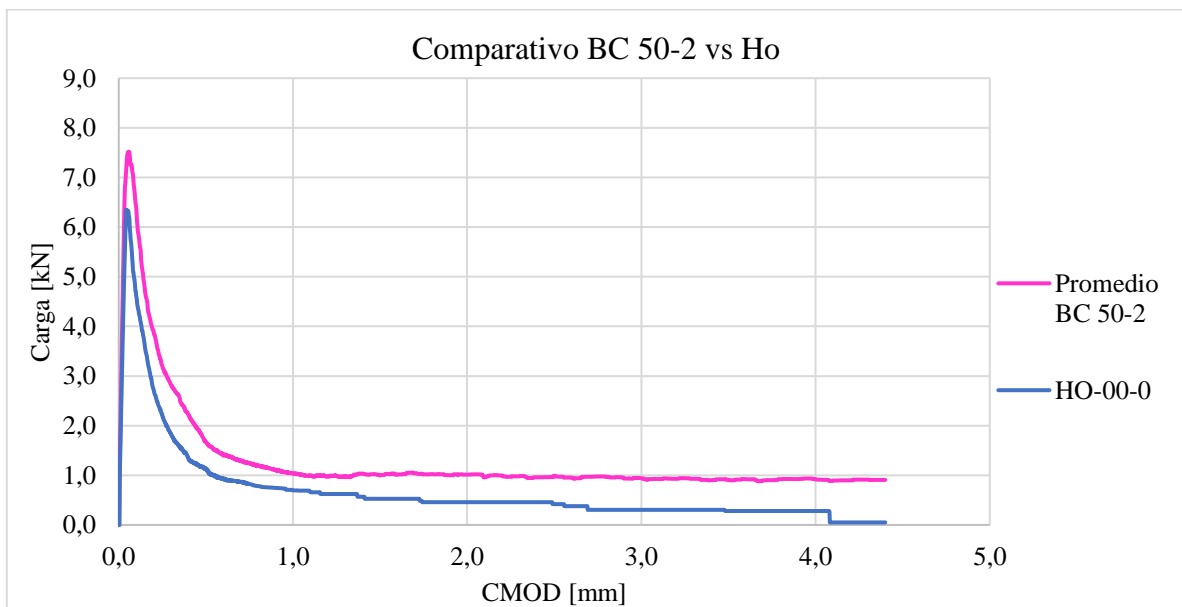


Gráfico 7.19 Comparación BC 50-4 versus Ho

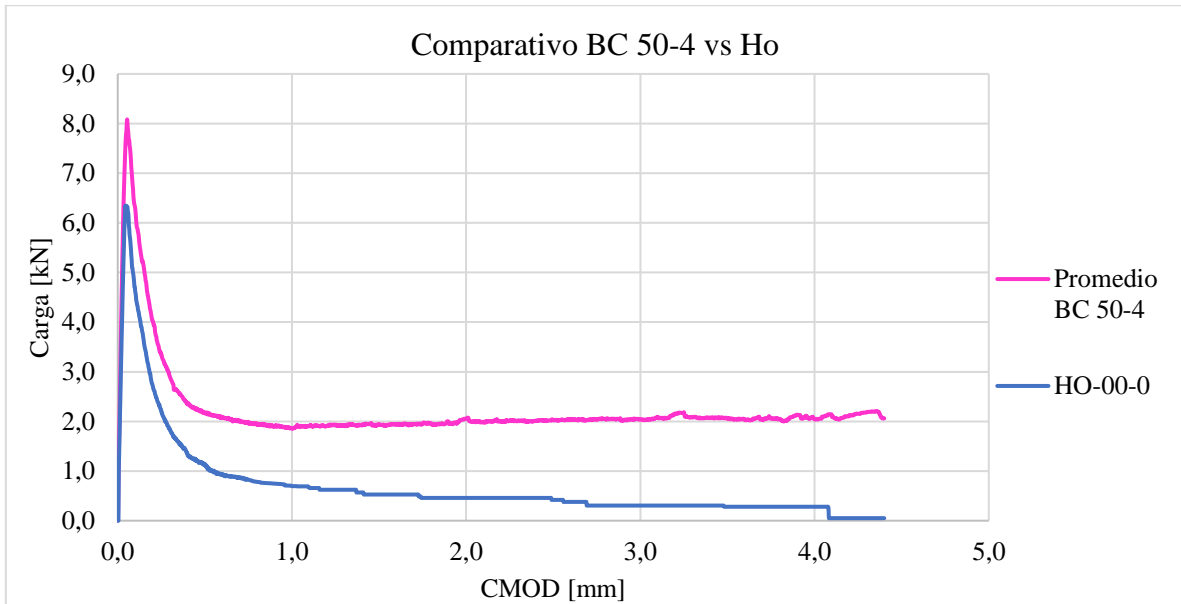


Gráfico 7.20 Comparación BC 50-6 versus Ho

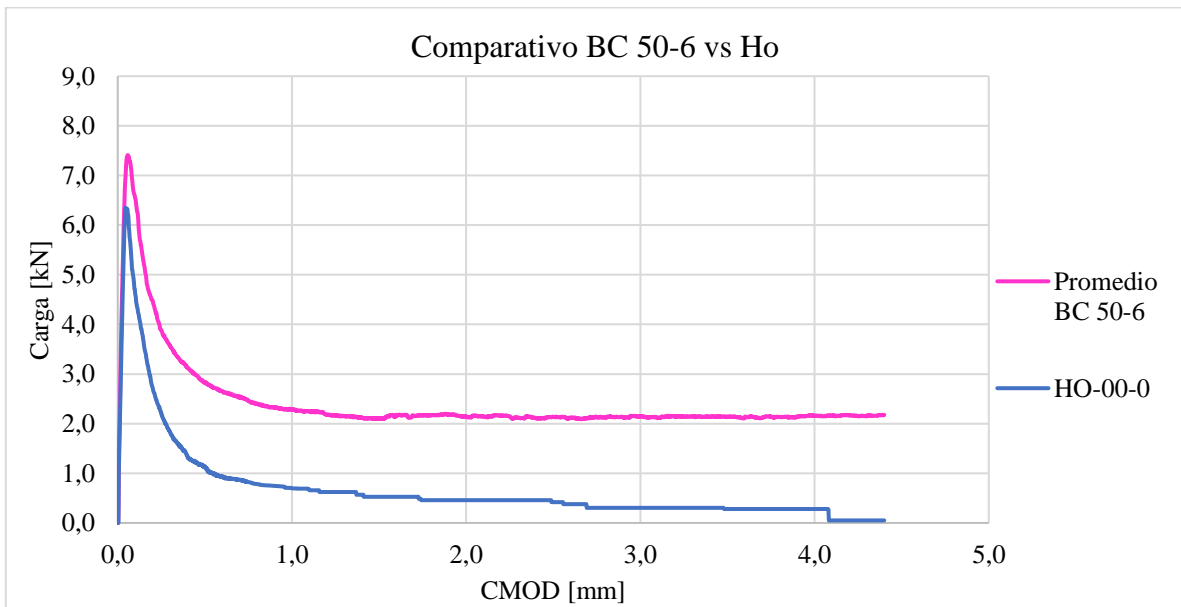


Gráfico 7.21 Comparación BC 50-8 versus Ho

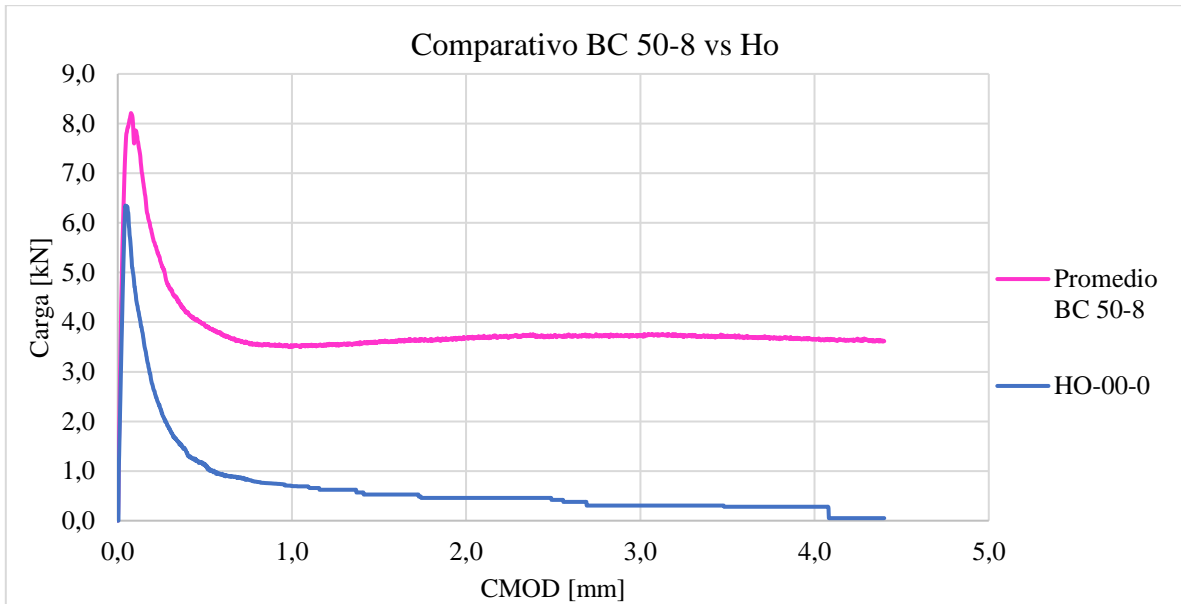


Gráfico 7.22 Comparación BC 54-2 versus Ho

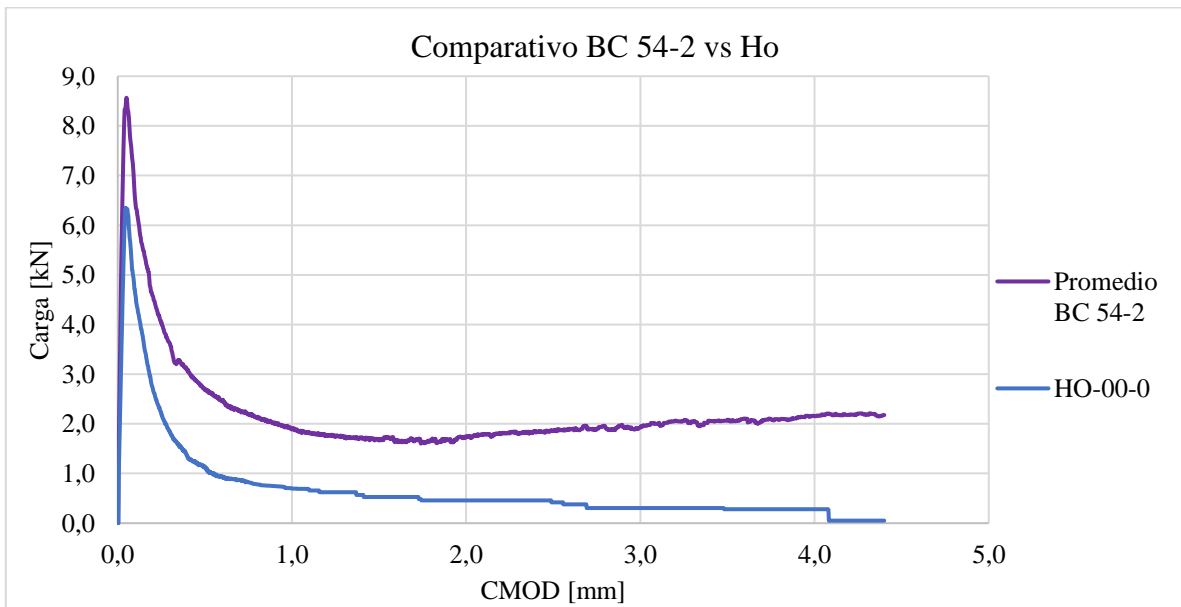


Gráfico 7.23 Comparación BC 54-4 versus Ho

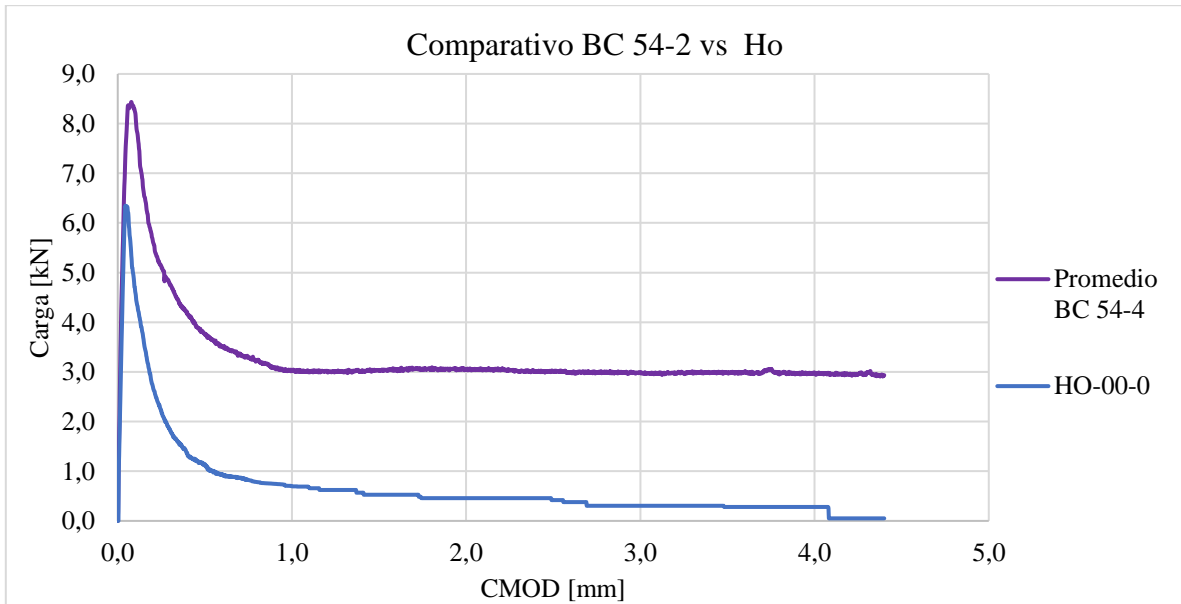


Gráfico 7.24 Comparación BC 54-6 versus Ho

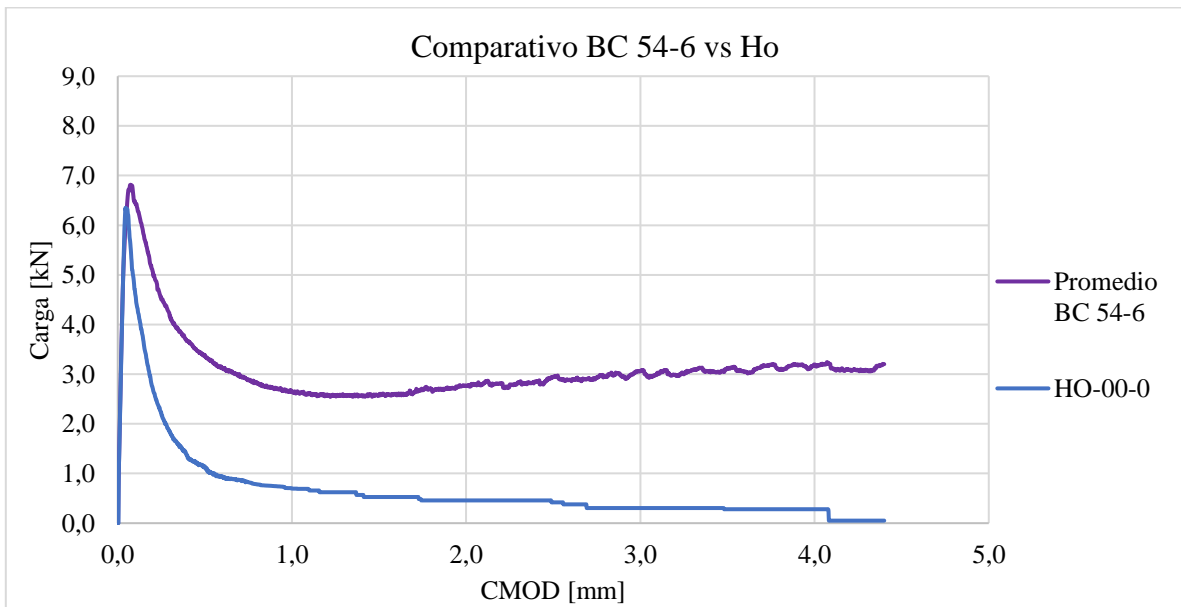
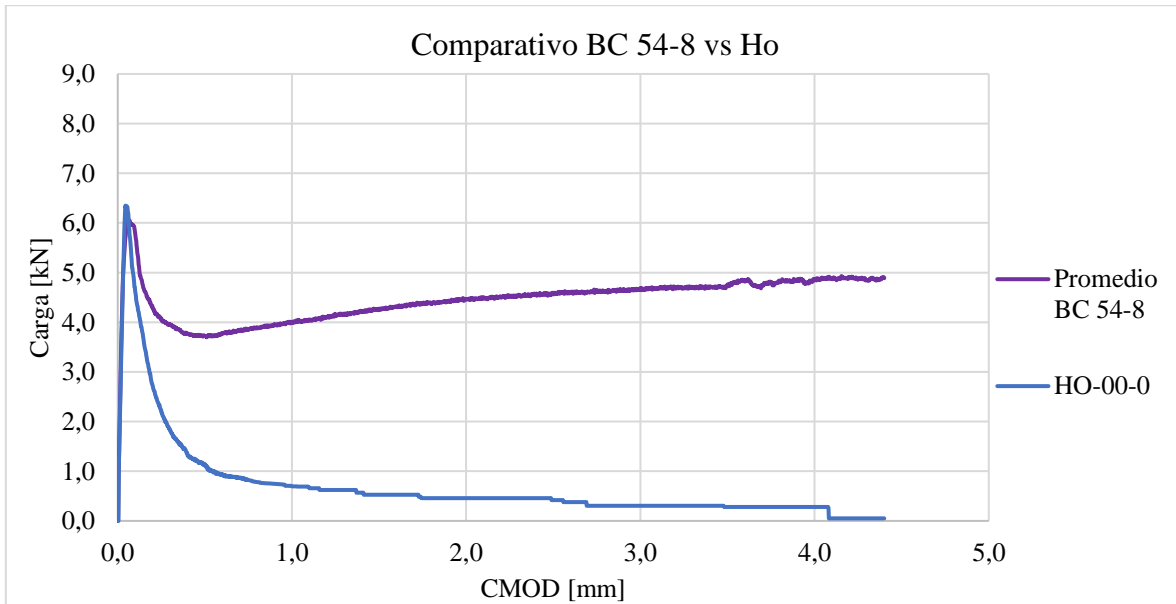


Gráfico 7.25 Comparación BC 54-8 versus Ho



### 7.3 VIGAS FALLIDAS

Gráfico 7.26 Curva esfuerzo-deformación viga entalla 2.5 mm

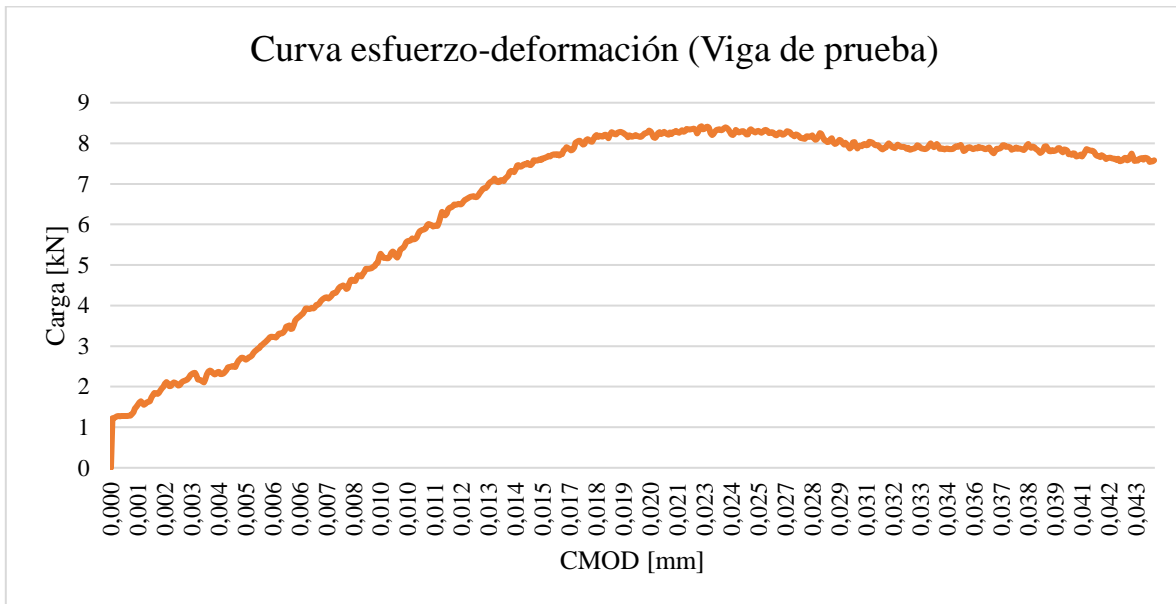
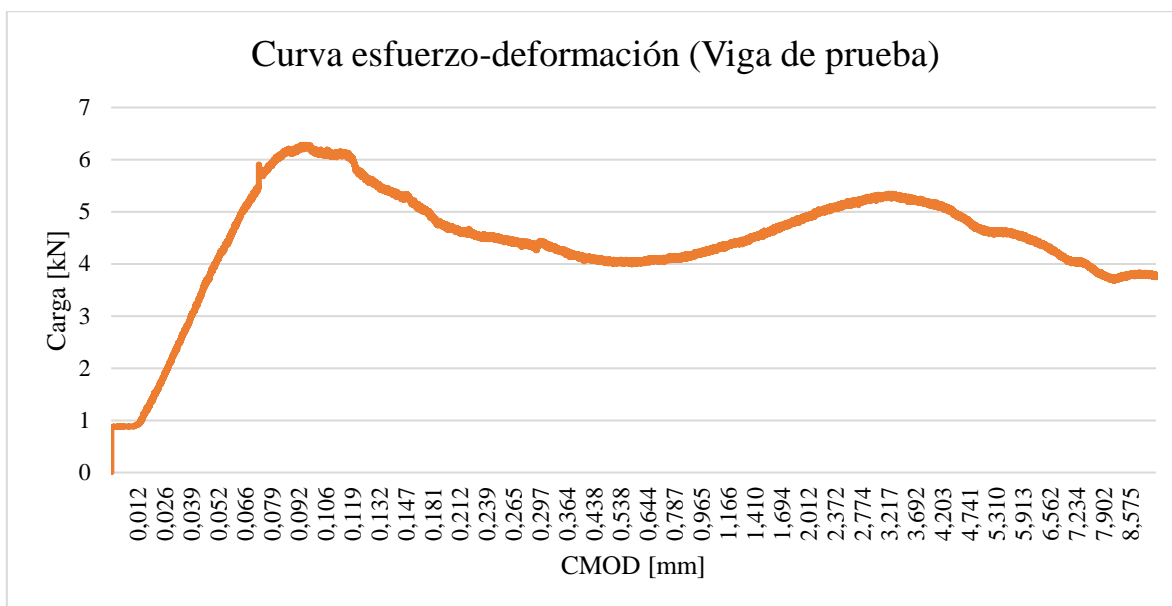


Gráfico 7.27 Curva esfuerzo-deformación viga con FC



## 7.4 DATOS INDIVIDUALES

Tabla 7.1 Ángulos individuales de las vigas

Identificador	Viga	Ángulo (°)	Promedio (°)	Promedio global (°)	Desv. std.	C.V %
HO-00-0	1	12,5	19,5	21,0	7,77	37%
		26,6				
	2	12,5	14,0			
		15,5				
	3	29,4	29,4			
		29,4				
BC 48-2	1	23,2	24,1	28,5	4,29	15%
		24,9				
	2	29,7	32,6			
		35,5				
	3	26,6	28,8			
		31,0				
BC 48-4	1	45,7	44,0	32,7	9,85	30%
		42,3				
	2	24,0	28,0			
		32,0				
	3	33,7	26,1			
		18,4				
BC 48-6	1	31,0	32,3	30,1	4,17	14%
		33,7				
	2	24,0	25,3			
		26,6				
	3	31,6	32,6			
		33,7				

<b>BC 48-8</b>	<b>1</b>	33,7	35,1	35,6	4,43	12%
		36,5				
	<b>2</b>	35,0	31,4			
		27,9				
	<b>3</b>	45,0	40,3			
		35,5				
<b>BC 50-2</b>	<b>1</b>	26,3	26,6	25,3	5,75	23%
		26,8				
	<b>2</b>	17,9	19,1			
		20,2				
	<b>3</b>	29,7	30,4			
		31,0				
<b>BC 50-4</b>	<b>1</b>	27,9	30,8	29,0	4,80	17%
		33,7				
	<b>2</b>	22,8	23,5			
		24,2				
	<b>3</b>	32,3	32,6			
		32,8				
<b>BC 50-6</b>	<b>1</b>	37,2	35,4	33,4	6,25	19%
		33,7				
	<b>2</b>	30,5	26,4			
		22,4				
	<b>3</b>	33,7	38,4			
		43,2				
<b>BC 50-8</b>	<b>1</b>	24,7	25,6	33,7	7,39	22%
		26,6				
	<b>2</b>	39,8	35,3			
		30,9				
	<b>3</b>	37,9	40,1			
		42,3				
<b>BC 54-2</b>	<b>1</b>	29,1	25,4	28,2	7,52	27%
		21,8				
	<b>2</b>	26,6	22,5			
		18,4				
	<b>3</b>	39,8	36,7			
		33,7				
<b>BC 54-4</b>	<b>1</b>	36,9	42,6	37,5	14,80	39%
		48,4				
	<b>2</b>	53,1	49,1			
		45,0				
	<b>3</b>	18,4	20,8			
		23,2				

<b>BC 54-6</b>	<b>1</b>	36,9	30,4	26,6	3,36	13%
		24,0				
	<b>2</b>	26,6	24,2			
		21,8				
	<b>3</b>	25,0	25,1			
		25,2				
<b>BC 54-8</b>	<b>1</b>	37,9	39,8	32,5	7,48	23%
		41,6				
	<b>2</b>	36,9	33,0			
		29,1				
	<b>3</b>	20,6	24,8			
		29,1				

Tabla 7.2 Valores individuales del ensayo de compresión

Probeta	Carga [Kn]	Carga específica [Mpa]	Promedio R.C [Mpa]
<b>HO 00-0</b>	464,6	26,3	26,067
	577,9	26,1	
	456,5	25,8	
<b>BC 48-2</b>	513,1	29,04	27,785
	468,8	26,53	
<b>BC 48-4</b>	565,2	31,99	31,847
	552,8	31,28	
	570,3	32,27	
<b>BC 48-6</b>	589,1	33,33	32,567
	555,9	31,46	
	581,6	32,91	
<b>BC 48-8</b>	419,6	23,75	24,657
	433,7	24,54	
	453,9	25,68	
<b>BC 50-2</b>	467	26,43	29,883
	556,6	31,5	
	560,5	31,72	
<b>BC 50-450</b>	567,4	32,11	30,727
	533,7	30,2	
	526,7	29,87	
<b>BC 50-600</b>	440,4	24,92	25,267
	435,3	24,63	
	463,9	26,25	
<b>BC 50-8</b>	563,4	31,88	33,487
	610,3	34,53	
	601,6	34,05	
<b>BC 54-2</b>	520,9	29,48	30,090
	535,5	30,3	
	538,8	30,49	
<b>BC 54-4</b>	541,6	30,65	31,307
	577,3	32,67	
	540,7	30,6	
<b>BC 54-6</b>	713,1	40,35	39,857
	698,3	40,35	
	686,9	38,87	

<b>BC 54-8</b>	572,1	32,37	34,567
	513,4	39,05	
	570,5	32,28	

Tabla 7.3 Valores individuales del ensayo de hendimiento

<b>Probeta</b>	<b>Carga [kN]</b>	<b>Resistencia T [Mpa]</b>	<b>Promedio Resist. T [Mpa]</b>
<b>HO 00-0</b>	162,00	2,29	2,29
	162,00	2,29	
<b>BC 48-2</b>	238,00	3,37	2,98
	182,80	2,59	
<b>BC 48-4</b>	218,10	3,09	2,70
	163,50	2,31	
<b>BC 48-6</b>	181,50	2,57	3,04
	248,40	3,51	
<b>BC 48-8</b>	212,90	3,01	3,08
	222,10	3,14	
<b>BC 50-2</b>	248,70	3,52	3,51
	247,20	3,50	
<b>BC 50-4</b>	210,90	2,98	3,27
	251,60	3,56	
<b>BC 50-6</b>	201,20	2,85	2,74
	185,80	2,63	
<b>BC 50-8</b>	267,10	3,78	3,83
	275,00	3,89	
<b>BC 54-2</b>	200,90	2,84	2,78
	192,40	2,72	
<b>BC 54-4</b>	204,60	2,89	2,87
	200,90	2,84	
<b>BC 54-6</b>	260,90	3,69	3,69
	260,90	3,69	
<b>BC 54-8</b>	220,20	3,12	3,37
	256,60	3,63	

## 7.5 IMÁGENES



*Ilustración 7.1 Imágenes referenciales de medición de ángulo*



*Ilustración 7.2 Posicionamiento ensayo compresión*



*Ilustración 7.3 Configuración ensayo propuesto*



*Ilustración 7.4 Posicionamiento LDVT y placa de vidrio*



*Ilustración 7.5 Grieta al terminar ensayo*

## 8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

---

### 8.1 LIBROS

- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology*. England: Longman Scientific & Technical.
- Shah, S. P., Swartz, S. E., & Ouyang, C. (1995). *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. John Wiley & Sons.

### 8.2 ARTÍCULOS Y PUBLICACIONES

- ACI (2013). *ACI Concrete Terminology*.
- ACI Committee 544. (2002). *Report on Fiber Reinforced Concrete*, Reported by ACI Committee 544, ACI 544.1R – 96 (Reapproved 2002), ACI Manual of Concrete Practice.
- Barragán B., Gettu R., Agullo L. y Zerbino R. (2006), *Shear Failure of Steel Fiber-Reinforced Concrete Based on Push-Off Tests*. ACI Materials Journal Vol. 103, pp 251 – 257.
- Barr B. (1987), *The Fracture Characteristics of FRC Materials in Shear, Fiber Reinforced Concrete: Properties and Applications*, SP – 105, Editado por S. P. Shah y B. Batson, American Concrete Institute, pp 27 – 53.
- Carmona S., Gettu R. y Aguado A. (1997), *Evaluation of the Fracture Behavior of High Performance Concrete. Proceedings of International Conference on Engineering Materials, Ottawa, Canada*, Vol. 2, pp 11 - 21.
- Carmona S. y Maripangui F. (2007), *Comportamiento del Hormigón Reforzado con Fibras Sometido a Esfuerzo de Corte*. Anales de las XVI Jornadas Chilenas del Hormigón. Talca, Chile. 10 pp.
- JSCE (1990), SF – 6, *Method of Test for Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, pp 67 – 69.
- Mirsayah A. y Banthia N. (2002), *Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete*. ACI Material Journal, Vol. 99, pp 473 - 479.
- Montardo, J. P. (2005). *La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos*.
- Olufunke A. (2014). *A Comparative Analysis of Modulus of Rupture and Splitting Tensile Strength of Recycled Aggregate Concrete*. American Journal of Engineering Research, Vol. 03, pp 141 - 147.
- Ragavendra, S., Reddy, I. P., & Dongre, A. (2017, November). *Fibre reinforced concrete-A case study*. In *Proceeding of 33rd national Convention of Architectural Engineers and National Seminar on Architectural Engineering Aspect for sustainable building envelopes*.
- Slater, E., Moni, M., & Alam, M. S. (2012). *Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams*. *Construction and Building Materials*, 26(1), 423-436.

### 8.3 TESIS Y MEMORIAS

- Cuenca E. (2008). *Comportamiento a cortante de elementos constructivos fabricados con hormigón autocompactante y hormigón reforzado con fibras*. Tesis de máster, UPV.

- Landa G. (2002). *Estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón mediante materiales compuestos*. Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria de la Construcció.
- Parrales J. (2020). *Análisis comparativo de las formulaciones existentes para evaluar la resistencia a cortante de hormigón con fibras*. Tesis de máster, UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental.

## 8.4 NORMAS

- ASTM. (2011). *Estándar especificación de concreto reforzado con fibras y hormigón proyectado*. (ASTM C1116-1103).
- INN. (1968). *Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales*. (NCh148.Of68).
- INN. (1975). *Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción*. (NCh1017.Of75).
- INN. (1977). *Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. (NCh1037.Of77).
- INN. (1977). *Hormigón - Ensayo de tracción por hendimiento*. (NCh1170.Of77).
- INN. (1978). *Hormigón - Refrentado de probetas*. (NCh1172.Of78).

## 8.5 WEB Y OTROS

- BarChip. (2019). *BarChip48 Product Data Sheet*. <https://barchip.com/>
- BarChip. (2019). *BarChipR50 Product Data Sheet*. <https://barchip.com/>
- BarChip. (2019). *BarChip54 Product Data Sheet*. <https://barchip.com/>
- Pezeshk S. (2014). *Design of Reinforced Concrete Structures*. (CIVL4135). Universidad de Memphis. <http://www.ce.memphis.edu/4135/>