

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



**AJUSTE EXPERIMENTAL DEL MODELO DE CUATRO
EXPONENCIALES PARA REPRESENTAR EL
COMPORTAMIENTO AL CORTE DE VIGAS DE HRF.**

MEMORIA DE TITULACIÓN PRESENTADA POR

MACIEL ALEJANDRA NICOL GARRIDO BARRERA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE
CONSTRUCTOR CIVIL

PROFESOR GUÍA: SERGIO ALEJANDRO CARMONA MALATESTA

Agradecimientos.

Agradezco a mi madre y mi padre por todo el esfuerzo, trabajo, dedicación y apoyo entregado durante toda mi vida. Agradezco a mi hermano, amigos y amigas, que han estado presente en este proceso y a los profesores que entregaron sus conocimientos durante todas mis etapas estudiantiles.

Resumen.

En el mundo de la construcción, uno de los materiales más importantes e investigados es el hormigón, su importancia radica en que es el soporte principal ante las cargas a las cuales es sometido como elemento estructural.

Mediante investigaciones se ha determinado que el uso de refuerzos y aditivos en el hormigón permite reducir costos y aumentar su ductilidad, entre ellos, se encuentra la fibra sintética.

La siguiente investigación está basada en el estudio de vigas de hormigón reforzado con fibras sintéticas, las cuales han sido sometidas a ensayos de laboratorio para poder determinar la resistencia al corte de cada una.

Para la ejecución de las vigas se han utilizados diferentes dosificaciones; 0, 2, 4, 6 y 8 [kg/m³], ello para poder generar conclusiones en base al volumen que contiene cada tipo de viga. También se han utilizado 3 tipos de fibras para hacer una comparación entre las características de cada una.

El ensayo consiste en someter a carga 3 vigas de cada tipo de fibra y dosificación, controlando la deformación (apertura de grietas). La máquina utilizada, mediante un software, genera un gráfico de carga - deformación, del cual se realiza un promedio que sea representativo para cada lote de vigas.

La investigación de M. K. Lee and B. I. G. Barr indica que las curvas generadas pueden ser graficadas mediante una función en base a modelos exponenciales y parámetros, que al iterar sus valores permiten graficar con mayor sensibilidad la curva representativa.

Por lo anterior, es que el objetivo de esta investigación es, mediante los gráficos promedios de cada tipo de viga, poder determinar el valor de los parámetros para cada modelo exponencial.

Adicionalmente se puede concluir que el volumen de fibras a considerar influye directamente en algunas propiedades, a mayor cuantía mayor tenacidad y resistencia de la mezcla ante las cargas sometidas. Es importante considerar que los datos y gráficos contienen algunas dispersiones por errores instrumentales y/o humanos.

Abstracts.

In the world of construction, one of the most important and studied materials is concrete, its importance lies in the fact that it is the main support against the loads to which it is subjected as a structural element.

Through research it has been determined that the use of reinforcements and additives in concrete allows the reducing of costs and the increasing of its ductility, among them there is synthetic fiber.

The following research is based on the study of beams reinforced with synthetic fibers, which have been subjected to laboratory tests to determine the shear resistance of each other.

Different dosages have been used for the execution of the beams; 0, 2, 4, 6 and 8 [kg/m³], thus in order to generate conclusions based on the volume that each type of beam contains 3 types of fibers, which has also been considered to compare the characteristics of each one.

The test consists of subjecting to load 3 beams of each type of fiber and dosage, controlling the deformation (opening of cracks). The machine used, by means of software, generates a graph of load v / s deformation, of which an average is made that is representative for each batch of beams.

The research of M. K. Lee and B. I. G. Barr indicates that the generated curves can be graphed using a function based on exponential models and parameters, which by iterating their values, it allows the representative curve to be graphed with greater sensitivity.

Therefore, the objective of this research is, through the average graphs of each type of beam, to be able to determine the value of the parameters for each exponential model.

In addition, it can be concluded that the volume of fibers to be considered, directly influences some properties. The greater the amount, the greater the toughness and resistance of the mixture to the loads subjected. It is important to consider that the data and graphs contain some dispersion due to instrumental and / or human errors.

Contenido.

1.	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	1
1.2	Metodología.....	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	HRF: Hormigón reforzado con fibras.....	3
2.2	Clasificación de fibras.....	3
2.3	Aplicación en estructuras.....	4
2.4	Comportamiento del uso de fibra.....	6
2.5	Ensayos para determinación de resistencia al corte.....	7
2.5.1	Modelación típica de resistencia al corte.....	9
2.6	Modelo exponencial – M. K. Lee and B. I. G. Barr.....	10
2.6.1	Modelo doble – e.....	10
2.6.2	Modelo de cuatro – e.....	11
2.6.3	Comportamiento de los parámetros.....	12
3	Investigación experimental.....	19
3.1	Materiales.....	19
3.1.1	Cemento.....	19
3.1.2	Áridos.....	19
3.1.3	Aditivos.....	19
3.1.4	Fibras BarChip.....	19
3.2	Dosificaciones.....	21
3.3	Ensayo al corte diagonal de vigas de HRF.....	21
4	Análisis de Resultados.....	23
4.1	Resistencia al corte – Vigas HRF.....	23
4.1.1	HO.....	23
4.1.2	BC 48.....	24
4.1.3	BC 50.....	26
4.1.4	BC 54.....	28
4.2	Modelo exponencial – Parámetros.....	30
4.2.1	HO.....	31
4.2.2	BC 48.....	32

4.2.3	BC 50.....	36
4.2.4	BC 54.....	40
5	Conclusiones.	44
6	Anexos.....	48
7	Bibliografía.	51

Índice de Ilustraciones.

Ilustración N°1:	Interior de la fisura (<i>“Hormigón reforzado con fibras” SikaFiber, Colombia</i>).	5
Ilustración N°2:	Pavimento con fibras (<i>Nicieza & Taverna Hnos, Argentina</i>).....	5
Ilustración N°3:	Piezas prefabricadas (<i>“Hormigón reforzado con fibras” SikaFiber, Colombia</i>).	6
Ilustración N°4:	Probetas tipo Z para ensayos de corte (<i>Barr, 1987</i>).....	8
Ilustración N°5:	Otras probetas utilizadas para ensayos de corte (<i>Shah et al, 1995</i>)	8
Ilustración N°6:	Configuración general del ensayo propuesto por la recomendación japonesa SF - 6	9
Ilustración N°7:	Comportamiento al corte típico de HRF (<i>“Comportamiento al corte de HRF” UTFSM</i>).....	9
Ilustración N°8:	Curvas $f(x)$ obtenidas variando α (<i>A four-exponential model, M.K Lee and B.I.G Barr</i>) ...	11
Ilustración N°9:	Modelo esquemático de cuatro – e (<i>A four-exponential model, M.K Lee and B.I.G Barr</i>)	12
Ilustración N°10:	Configuración ensayo al corte diagonal (<i>LEMCO UTFSM, Chile</i>)	22
Ilustración N°11:	Ensayo al corte diagonal (<i>LEMCO UTFSM, Chile</i>).	22
Ilustración N°12:	Grieta de viga sometida a carga (<i>LEMCO UTFSM, Chile</i>).	22

Índice de Gráficos

Gráfico N°1:	Sensibilidad variando parámetro C1.	13
Gráfico N°2:	Sensibilidad variando parámetro C2.	14
Gráfico N°3:	Sensibilidad variando parámetro C3.	15
Gráfico N°4:	Sensibilidad variando parámetro C4.	16
Gráfico N°5:	Sensibilidad variando parámetro C5.	17

Gráfico N°6: Sensibilidad variando parámetro C6.	18
Gráfico N°7: Vigas HO – 0 [kg/m ³]	23
Gráfico N°8: Promedio vigas HO – 0 [kg/m ³]	23
Gráfico N°9: Vigas BC 48 – 2 [kg/m ³]	24
Gráfico N°10: Promedio vigas BC 48 – 2 [kg/m ³]	24
Gráfico N°11: Vigas BC 48 – 4 [kg/m ³]	24
Gráfico N°12: Promedio vigas BC 48 – 4 [kg/m ³]	24
Gráfico N°13: Vigas BC 48 – 6 [kg/m ³]	25
Gráfico N°14: Promedio vigas BC 48 – 6 [kg/m ³]	25
Gráfico N°15: Vigas BC 48 – 8 [kg/m ³]	25
Gráfico N°16: Promedio vigas BC 48 – 8 [kg/m ³]	25
Gráfico N°17: Vigas BC 50 – 2 [kg/m ³]	26
Gráfico N°18: Promedio vigas BC 50 – 2 [kg/m ³]	26
Gráfico N°19: Vigas BC 50 – 4 [kg/m ³]	26
Gráfico N°20: Promedio vigas BC 50 – 4 [kg/m ³]	26
Gráfico N°21: Vigas BC 50 – 6 [kg/m ³]	27
Gráfico N°22: Promedio vigas BC 50 – 6 [kg/m ³]	27
Gráfico N°23: Vigas BC 50 – 8 [kg/m ³]	27
Gráfico N°24 Promedio vigas BC 50 – 8 [kg/m ³]	27
Gráfico N°25: Vigas BC 54 – 2 [kg/m ³]	28
Gráfico N°26: Promedio vigas BC 54 – 2 [kg/m ³]	28
Gráfico N°27: Vigas BC 54 – 4 [kg/m ³]	28
Gráfico N°28: Promedio vigas BC 54 – 4 [kg/m ³]	28
Gráfico N°29: Vigas BC 54 – 6 [kg/m ³]	29
Gráfico N°30: Promedio vigas BC 54 – 6 [kg/m ³]	29
Gráfico N°31: Vigas BC 54 – 8 [kg/m ³]	29

Gráfico N°32: Promedio vigas BC 54 – 8 [kg/m ³]	29
Gráfico N°33: Modelo exponencial HO – 0 [kg/m ³]	31
Gráfico N°34: Modelo exponencial BC 48 – 2 [kg/m ³]	32
Gráfico N°35: Modelo exponencial BC 48 – 4 [kg/m ³]	33
Gráfico N°36: Modelo exponencial BC 48 – 6 [kg/m ³]	34
Gráfico N°37: Modelo exponencial BC 48 – 8 [kg/m ³]	35
Gráfico N°38: Modelo exponencial BC 50 – 2 [kg/m ³]	36
Gráfico N°39: Modelo exponencial BC 50 – 4 [kg/m ³]	37
Gráfico N°40: Modelo exponencial BC 50 – 6 [kg/m ³]	38
Gráfico N°41: Modelo exponencial BC 50 – 8 [kg/m ³]	39
Gráfico N°42: Modelo exponencial BC 54 – 2 [kg/m ³]	40
Gráfico N°43: Modelo exponencial BC 54 – 4 [kg/m ³]	41
Gráfico N°44: Modelo exponencial BC 54 – 6 [kg/m ³]	42
Gráfico N°45: Modelo exponencial BC 54 – 8 [kg/m ³]	43

Índice de Tablas

Tabla N°1: Casos a evaluar en cada parámetro	13
Tabla N°2: Valores para análisis de C1	13
Tabla N°3: Valores para análisis de C2	14
Tabla N°4: Valores para análisis de C3	15
Tabla N°5: Valores para análisis de C4	16
Tabla N°6: Valores para análisis de C5	17
Tabla N°7: Valores para análisis de C6	18
Tabla N°8: Propiedades fibra BarChip 48 (<i>The Synthetic Fibre Experts, BarChip.Inc</i>)	20
Tabla N°9: Propiedades fibra BarChip 50 (<i>The Synthetic Fibre Experts, BarChip.Inc</i>)	20

Tabla N°10: Propiedades fibra BarChip 54 (<i>The Synthetic Fibre Experts, BarChip.Inc</i>)	21
Tabla N°11: Dosificación de la mezcla de HRF.	21
Tabla N°12: Parámetros ecuaciones de vigas HO	44
Tabla N°13: Parámetros ecuaciones de vigas con fibras	44
Tabla N°14: Ángulo grietas en vigas con Fibra BC 48.....	48
Tabla N°15: Ángulos grietas en vigas con Fibra BC 50	49
Tabla N°16: Ángulos grietas en vigas con Fibra BC 54	50

1. Introducción.

En el mundo de la construcción es necesario realizar estudios a los materiales para poder conocer de que están formados, cuáles son sus propiedades y en base a ello decidir el uso que tendrá.

Uno de los materiales más utilizado en el área de construcción es el hormigón, el cual posee una alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tracción. Es por esta carencia que la industria se ha encargado de realizar investigaciones explorando diversos materiales que le otorguen mejores características al material, como mayor vida útil, mejor trabajabilidad, mayor resistencia, disminución de costos, etc.

Hoy en día, el hormigón no trabaja solo, va acompañado por un refuerzo interno de barras de acero que es capaz de soportar los esfuerzos de tracción. Adicionalmente, el uso de aditivos (retardante, acelerante, plastificante, entre otros) ha sido importante ya que mejora las características de la mezcla dependiendo del uso que se requiera

Otro de los materiales que ha sido motivo de estudios, es la incorporación de fibras sintéticas o de acero en la mezcla, la cual genera una mejor interacción en la matriz, disminuyendo la fragilidad del hormigón y evitando las fallas súbitas del elemento sometido a flexión.

La siguiente investigación está enfocada en el estudio de la resistencia al corte que poseen las vigas de hormigón reforzado con fibras

1.1 Objetivos.

El objetivo principal es ajustar los parámetros experimentales del modelo de doble exponencial, para representar la respuesta carga – apertura de fisura del hormigón sometido a corte.

Los objetivos secundarios son:

- Evaluar el efecto de los parámetros experimentales del modelo de doble exponencial en la respuesta carga – apertura de fisura de vigas de hormigón reforzado con fibras sometido a corte.

- Determinar los parámetros experimentales mediante ajustes del modelo de doble exponencial.
- Interpretar físicamente los valores de los parámetros experimentales determinados.

1.2 Metodología.

La ejecución de vigas es realizada en LEMCO en base a una dosificación definida previamente, diferenciándose por la cantidad y tipo de fibra en su mezcla. Éstas son agrupadas generando lotes identificables para mantener un orden durante la realización de los ensayos.

Se tienen 5 vigas de cada grupo, las cuales poseen dimensiones específicas y un entalle ejecutado previo al ensayo. Éstas son sometidas a carga, controlando la velocidad de apertura de la grieta, la cual, al finalizar el ensayo, es medida de forma manual para registrar los ángulos formados.

Los resultados de cada viga generan la base de datos necesaria para el estudio del comportamiento al corte de las vigas de HRF.

Con lo anterior se determina la curva representativa de cada lote, se estipulan algunas condiciones para una elección equitativa entre las curvas carga-deformación y se interpretan los comportamientos de cada una considerando el tipo de fibra que poseen.

Finalmente, en base a la investigación de Barr, se estipula una fórmula de cuatro exponenciales la cual representa el comportamiento de la curva carga-deformación, ésta contiene seis parámetros, los cuales, mediante iteraciones modelan, una curva que tiene como objetivo generar un gráfico que mejor represente a la curva experimental obtenida.

2 Marco teórico.

2.1 HRF: Hormigón reforzado con fibras.

El hormigón al estar sometido constantemente a cargas, presenta un comportamiento dependiendo de su estructura interna (materiales, dosificación y adherencia) y de las condiciones/parámetros externos que se presenten (tipo, magnitud y velocidad de carga, tiempo de exposición, etc.). Es necesario entender este comportamiento para poder predecir, mediante fórmulas, la capacidad de resistencia que tendrá el hormigón bajo ciertas condiciones.

Con la finalidad de mejorar las propiedades internas que presenta el hormigón, es que se le incorporan otros materiales como, los agregados pétreos, las barras de acero, aditivos y/o fibras, siendo este último, uno de los más recientes en el mundo de la construcción.

El uso de las fibras para el refuerzo de hormigón ha ido aumentando, y con él, el estudio de las mismas. Se han considerado y utilizado una amplia gama de fibras de diferentes propiedades mecánicas, físicas y químicas para el refuerzo de matrices cementosas.

Al caracterizar la naturaleza de las fibras, se pueden considerar dos niveles de descripción geométrica; la primera son las formas de las fibras individuales y la segunda es su dispersión en las matrices.

Adicionalmente, se pueden clasificar dependiendo del tamaño, forma, materialidad y procesos de fabricación.

2.2 Clasificación de fibras.

El aumento de resistencia entregada por la fibra a la mezcla, está directamente relacionada con la cantidad incorporada, sin embargo, la capacidad entregada dependerá también del tipo de fibra que se utilice.

La clasificación de fibras se presenta según:

- Tamaño.
 - Micro-fibras < 0,20 mm diámetro.
 - Macro-fibras \geq 0,20 mm diámetro.
- Forma
 - Rectas, onduladas corrugadas, extremos diferentes.

- Materialidad.
Acero, sintética, vidrio, natural.
- Proceso de fabricación.
Trefiladas (tipo I), cortadas en láminas (tipo II), extraídas por resacado en caliente (tipo III), acero fundido (tipo IV).

2.3 Aplicación en estructuras.

En las últimas décadas el empleo de hormigón reforzado con fibras se está utilizando en el mundo de la construcción a escala internacional. Ya es habitual la ejecución de obras de soleras y pavimentaciones industriales, hormigones proyectados para el sostenimiento de túneles, taludes y piscinas, hormigones prefabricados, entre otras actividades.

Gracias a las investigaciones en base a este agregado, se han desarrollado nuevas fibras sintéticas con capacidad de armar estructuralmente el hormigón, permitiendo eliminar mallas metálicas y disminuir armaduras en determinadas condiciones, obteniéndose resistencias residuales a flexo tracción similares, aportando otras ventajas.

Actualmente es utilizado en:

Hormigones/morteros proyectado.

Se ha vuelto mucho más importante debido al desarrollo de nuevos y más eficaces tipos de fibra, su aumento de disponibilidad y su inclusión en varias normas. Se puede considerar como la combinación perfecta con el hormigón proyectado. Al igual que el hormigón convencional, el hormigón proyectado es un material frágil, con limitada tracción y resistencia a la flexión, pero con muy buena resistencia a la compresión.

Se puede reforzar el hormigón proyectado con acero convencional, pero su instalación es laboriosa, lleva mucho tiempo y con frecuencia en condiciones que son aún de seguridad crítica. Además, las barras de refuerzo no están bien adaptadas al diseño de espesor de capa flexible del hormigón proyectado. Por esta razón, tiene sentido utilizar hormigón proyectado reforzado con fibras.

Su uso es tanto en el sostenimiento de obras subterráneas (túneles, cavernas, minería), como en la estabilización de taludes y ejecución de piscinas.



Ilustración N°1: Interior de la fisura (*“Hormigón reforzado con fibras” SikaFiber, Colombia*).

Pisos y pavimentos.

Las macrofibras en pisos y pavimentos reemplazan la malla electrosoldada que es colocada en el centro del espesor (otros autores prefieren localizarla en el centro del tercio superior), destinada a absorber los esfuerzos de temperatura y retracción en dichos elementos.

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

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



Ilustración N°2: Pavimento con fibras (*Nicieza & Taverna Hnos, Argentina*)

Piezas prefabricadas.

Para elementos prefabricados cuyas dimensiones y espesores están optimizados, las fibras han sido desde la década de los setenta un elemento común. El transporte, la colocación de estos elementos hacen que sean susceptibles a desportillamientos, agrietamientos y descascaramientos. Las fibras (micro y macro) en estos casos resultan muy útiles debido a que el agrietamiento de los elementos se reduce y si tiene lugar, le permiten a la unidad continuar funcionando sin desecharla.

Hoy en día las fibras de polipropileno, nylon, polietileno, metal etc., que son inocuas frente a la salud humana, se emplean con fines similares en la producción de prefabricados. Tanto en la prefabricación pesada (pilotes, postes, dovelas, vigas) como en la prefabricación liviana (ladrillos, láminas, etc.).

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



Ilustración N°3: Piezas prefabricadas (*"Hormigón reforzado con fibras" SikaFiber, Colombia*).

2.4 Comportamiento del uso de fibra.

En general el hormigón es considerado como un material frágil con una baja resistencia de tensión y capacidad de corte. La falla de corte de las vigas de hormigón reforzado es una preocupación común al momento del cálculo estructural.

La incorporación de las fibras a la mezcla de hormigón, mejora el corte y resistencia de las partes del hormigón, éstas ayudan a formar puentes a través del desarrollo de grietas, lo cual provee mayor resistencia a la apertura de las mismas, reduciendo así la posibilidad de una falla repentina en el hormigón y generado una falla progresiva.

A escala estructural, las fibras se extienden a través de las grietas y transmiten tensiones de tracción incluso cuando la capacidad de los agregados ha fallado, proporcionando así estabilidad estructural. El resultado de ello es un aumento en la ductilidad de la estructura.

Varias investigaciones, han establecido que la incorporación de fibras a la mezcla genera un aumento significativo en la resistencia al corte, sin embargo, ha sido difícil predecir exactamente este aumento, ya que la interacción de fibras y la matriz del hormigón es compleja.

Existen parámetros independientes de la fibra que afectan dicho aumento en la resistencia. Algunos son; materialidad, dimensiones, textura, dosificación, orientación de las fibras, entre otras.

2.5 Ensayos para determinación de resistencia al corte.

Actualmente existe un gran interés en determinar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras frente a las condiciones de carga a que es sometido. Las roturas por corte producidas, son consideradas como frágiles, y con la adición de las fibras, es que se genera un incremento en la ductilidad del elemento estudiado. Por este motivo es que se proponen diferentes tipos de probetas y ensayos que tienen por objetivo generar esfuerzos de corte en un plano de falla predefinido recurriendo al empleo de barras y cargas de compresión.

El ensayo de probetas tipo Z ha sido utilizado para la determinación de la respuesta al corte directo del hormigón (Barr, 1987).

La probeta es sometida a tensiones de corte debido a una carga externa. Ésta está conformada por dos bloques tipo L que se encuentran unidos a un plano sobre el cual es aplicada la carga. Sin embargo, los ensayos realizados 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 ello, es que se han propuesto otras alternativas de ensayo, vigas o paneles en flexión con una o dos entalles excéntricos y carga central o vigas con dos entalles centrales y cargas excéntricas (Ilustración N°4 y 5)

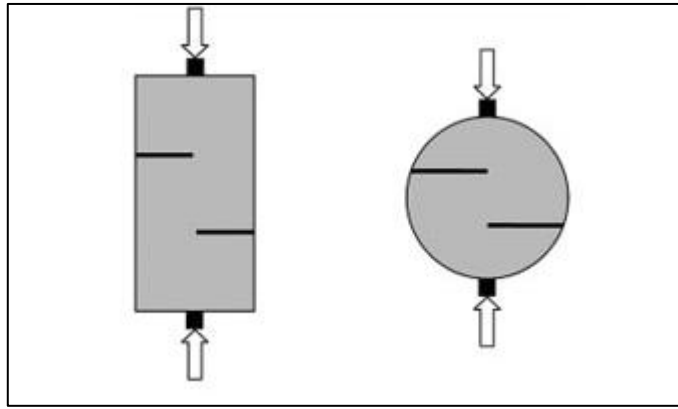


Ilustración N°4: Probetas tipo Z para ensayos de corte (Barr, 1987)

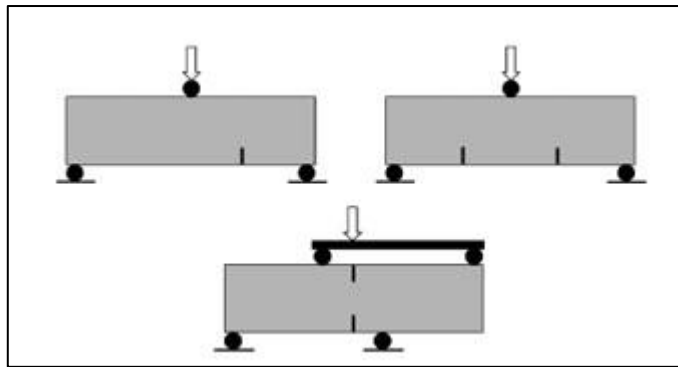


Ilustración N°5: Otras probetas utilizadas para ensayos de corte (Shah et al, 1995)

El procedimiento establecido en la recomendación JSCE – SF6, establece el uso de la configuración como se observa en la Ilustración N°6. 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.

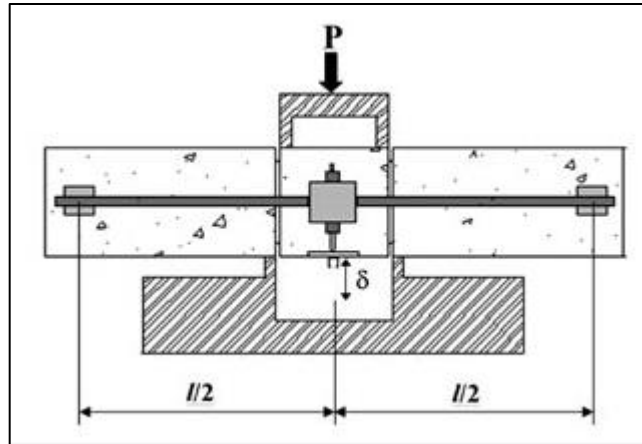


Ilustración N°6: Configuración general del ensayo propuesto por la recomendación japonesa SF - 6

2.5.1 Modelación típica de resistencia al corte.

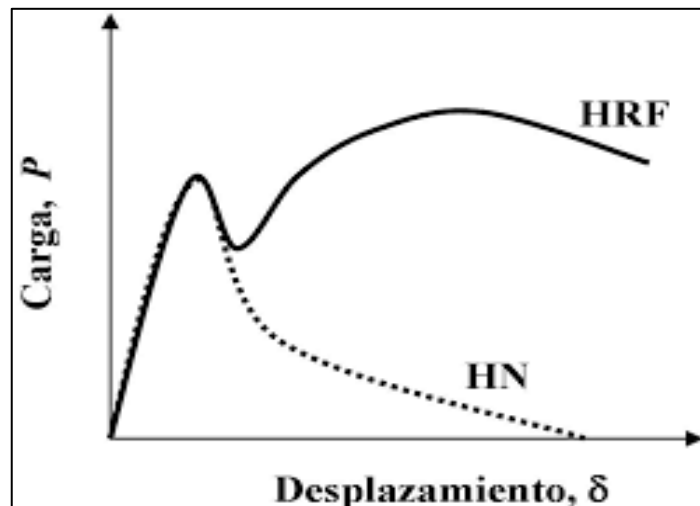


Ilustración N°7: Comportamiento al corte típico de HRF (*"Comportamiento al corte de HRF" UTFSM*)

La curva HN representa al hormigón natural (sin fibras), presentando por primera vez una respuesta aproximadamente lineal antes de alcanzar la carga máxima permitida. Después del agrietamiento la

respuesta de la deformación se vuelve altamente no lineal, con la forma de la curva HRF, decayendo de manera exponencial, sin recuperación. Esta curva muestra un comportamiento postfisuración en el que aumenta la tenacidad de manera considerable. Este efecto dependerá del volumen, tipo de fibra y orientación con respecto a las caras de las grietas.

2.6 Modelo exponencial – M. K. Lee and B. I. G. Barr.

La forma de la respuesta del gráfico carga – deformación de HRF es necesaria cuando se realizan análisis no lineales del comportamiento del material, es por ello que M. K. Lee and B. I. G. Barr proponen en su investigación una función de doble exponencial que, mediante la determinación de algunos parámetros, definen de manera aproximada la curva estudiada.

Su investigación se considera como el primer paso para el desarrollo de modelos que puedan describir el amplio rango de resultados obtenidos a partir del hormigón tradicional y el HRF, que tienen el potencial de mejorar significativamente el análisis de estructuras de hormigón.

El modelo tiene la capacidad de simular la respuesta de un material sometido a carga en un rango de comportamiento entre frágil a elasto-plástico.

2.6.1 Modelo doble – e.

Los autores introducen un modelo de doble exponencial para el hormigón liso. El modelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$y = C_1 (e^{-C_2 x} - e^{-C_3 x}) \quad (1)$$

Donde $y = f(x)$ y $C_3 = \alpha C_2$

Las constantes C_1 , C_2 y α son las que controlan la forma del modelo doble e, el cual se ha demostrado que es adecuado para modelar el comportamiento de deflexión del hormigón liso, siendo flexible y ampliamente aplicable.

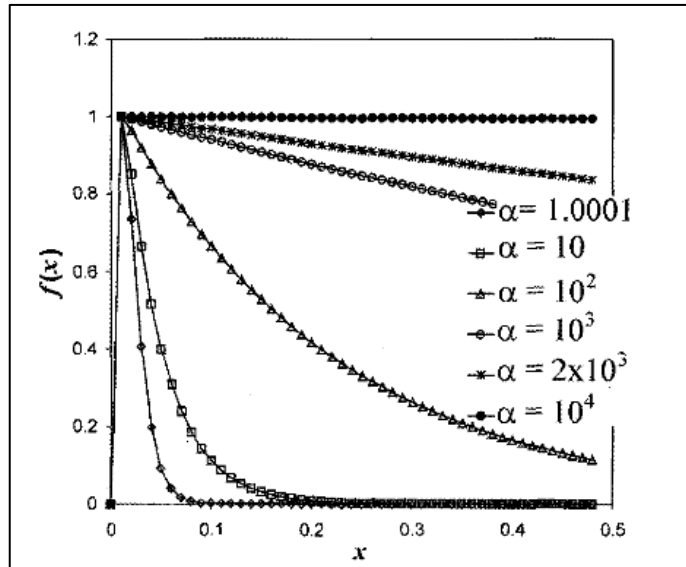


Ilustración N°8: Curvas $f(x)$ obtenidas variando α (A four-exponential model, M.K Lee and B.I.G Barr)

Al variar α de 1 a ∞ , el modelo modifica su respuesta $f(x)$, de una respuesta aproximadamente frágil a una respuesta elástica-plástica, como se muestra en la Ilustración N°8.

2.6.2 Modelo de cuatro – e.

El comportamiento del HRF generalmente presenta curvas de cargas más complejas en relación con las observadas para el hormigón liso.

Se propone cuatro funciones exponenciales en base a una superposición de dos modelos de doble exponencial, donde la expresión general se considera como:

$$y = C_1 (e^{-C_2 x} - e^{-C_3 x}) + C_4 (e^{-C_5 x} - e^{-C_6 x}) \quad (2)$$

Donde $y = f(x)$ y C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 y C_6 son constantes.

El comportamiento de la curva queda definido como muestra la Ilustración N°9:

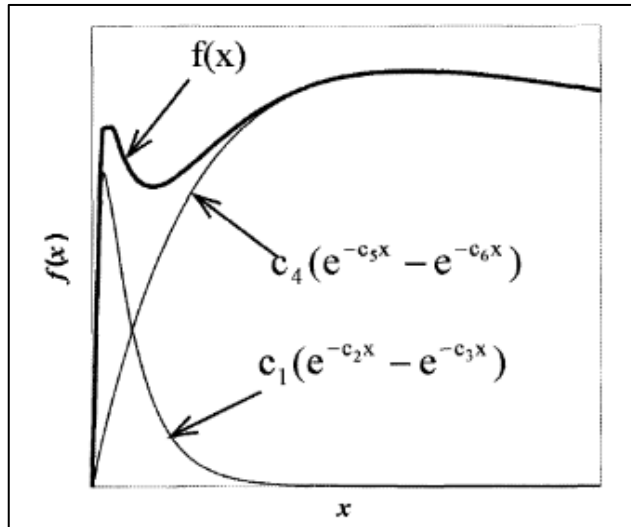


Ilustración N°9: Modelo esquemático de cuatro – e (A four-exponential model, M.K Lee and B.I.G Barr)

La primera expresión de doble – e ($C_1 C_2 C_3$) puede considerarse como la representante de la contribución de la matriz del hormigón, mientras que la segunda expresión de doble – e ($C_4 C_5 C_6$) representa el aumento de la dureza debido a la adición de la fibra, éste puede ser o no mayor al primer máximo que presente la curva.

Reconociendo el hecho de que el modelo de cuatro – e es la resultante de la superposición de los modelos (2), la tarea a desarrollar es determinar los parámetros de cada viga estudiada en LEMCO y determinar similitudes o diferencias respecto a las fibras y volúmenes estudiados.

2.6.3 Comportamiento de los parámetros.

Los valores a utilizar para cada parámetro han sido designados de tal manera que se logre visualizar el cambio que se genera en la curva. Para ello, se propone un caso para cada parámetro, en el cual se varía (VAR) los valores de dicho parámetro, manteniendo las otras 5 constantes (CTE)

Tabla N°1: Casos a evaluar en cada parámetro.

Casos	Parámetros					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Caso 1	VAR	CTE	CTE	CTE	CTE	CTE
Caso 2	CTE	VAR	CTE	CTE	CTE	CTE
Caso 3	CTE	CTE	VAR	CTE	CTE	CTE
Caso 4	CTE	CTE	CTE	VAR	CTE	CTE
Caso 5	CTE	CTE	CTE	CTE	VAR	CTE
Caso 6	CTE	CTE	CTE	CTE	CTE	VAR

- Parámetro C1

Tabla N°2: Valores para análisis de C1.

MODELO 1			MODELO 2		
C1	C2	C3	C4	C5	C6
5,0	2,0	20,0	0,5	0,0	20,0
7,5	2,0	20,0	0,5	0,0	20,0
10,0	2,0	20,0	0,5	0,0	20,0
12,5	2,0	20,0	0,5	0,0	20,0

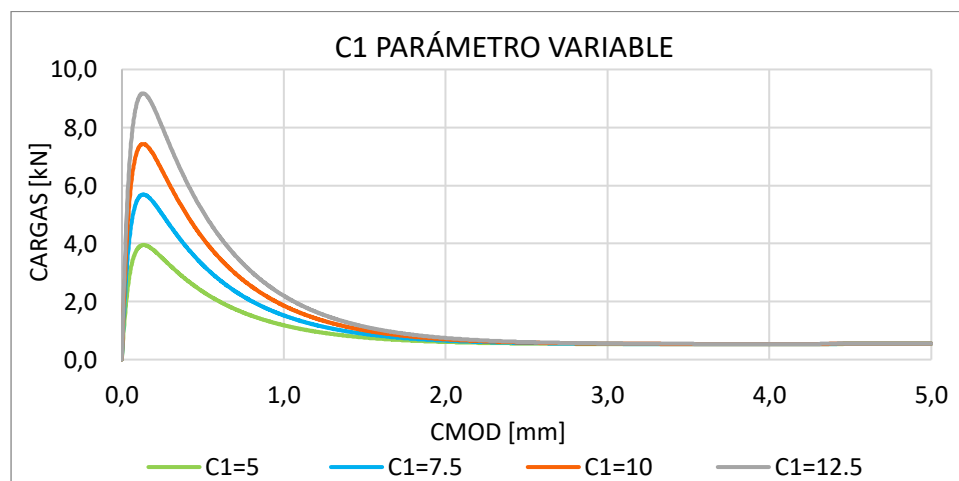


Gráfico N°1: Sensibilidad variando parámetro C1.

Se designan valores cada 2,5. Se observa gráficamente que al variar el parámetro C1 se produce un efecto en la amplitud de la sección lineal de la curva, por lo tanto, se puede considerar como el parámetro que determina visualmente la carga máxima alcanzada por la viga ensayada

- A mayor C1, mayor pick en la curva.

- A menor C1, menor pick en la curva.

- Parámetro C2.

Tabla N°3: Valores para análisis de C2.

MODELO 1			MODELO 2		
C1	C2	C3	C4	C5	C6
10,0	0,5	20,0	0,5	0,0	20,0
10,0	1,0	20,0	0,5	0,0	20,0
10,0	2,0	20,0	0,5	0,0	20,0
10,0	4,0	20,0	0,5	0,0	20,0

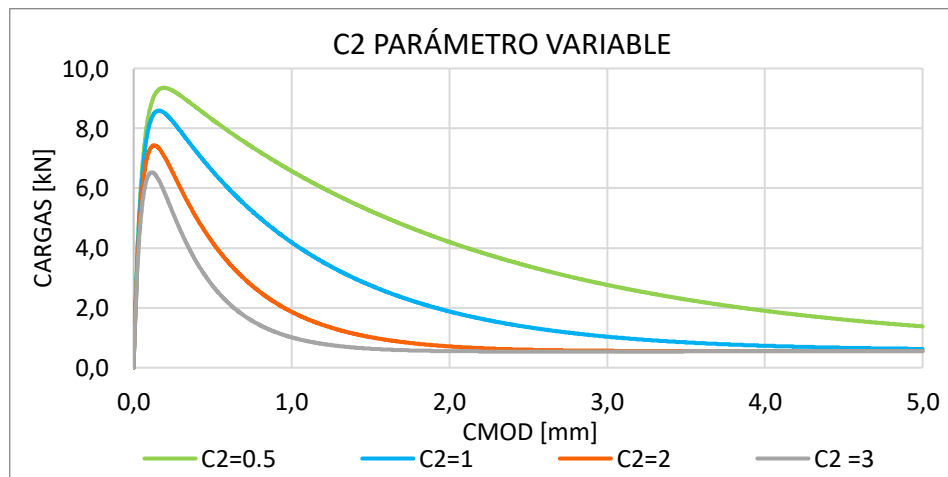


Gráfico N°2: Sensibilidad variando parámetro C2.

Se designan valores cada 1 aproximadamente. Se observa gráficamente que al variar el parámetro C2, el descenso de la gráfica es más sensible o más curvo. Se puede considerar como el parámetro que determina visualmente la sensibilidad del descenso en la curva de la viga ensayada, de igual manera afecta en la altura de la carga máxima alcanzada.

- A mayor C2, la curva se vuelve más cerrada.
- A menor C2, en la curva se genera una mayor apertura.

- Parámetro C3.

Tabla N°4: Valores para análisis de C3.

MODELO 1			MODELO 2		
C1	C2	C3	C4	C5	C6
10,0	2,0	5,0	0,5	0,0	20,0
10,0	2,0	10,0	0,5	0,0	20,0
10,0	2,0	20,0	0,5	0,0	20,0
10,0	2,0	50,0	0,5	0,0	20,0

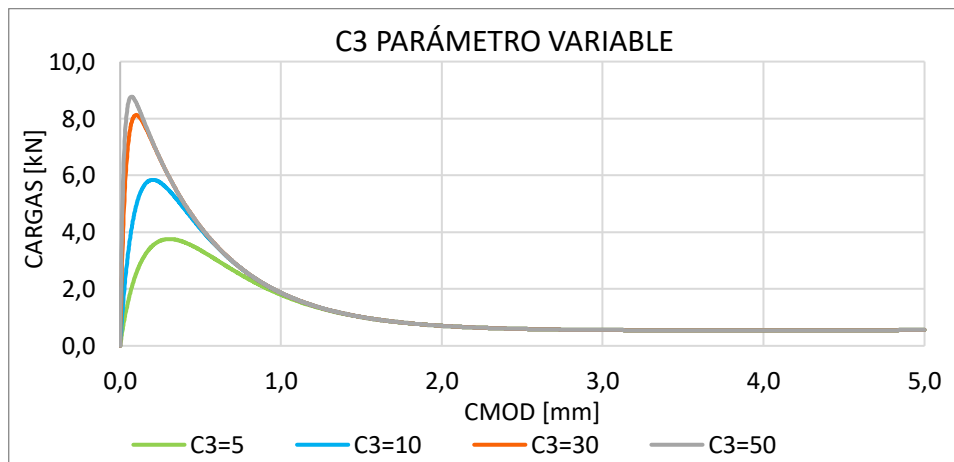


Gráfico N°3: Sensibilidad variando parámetro C3.

Se designan valores cada 20 aproximadamente. Se observa gráficamente que al variar el parámetro C3, produce un efecto en la pendiente del inicio de la curva, de igual manera afecta en la altura de la carga máxima alcanzada.

- A mayor C3, mayor es la pendiente previa al pick y mayor es el máximo.
- A menor C3, menor es la pendiente previa al pick y menor es el máximo.

- Parámetro C4.

Tabla N°5: Valores para análisis de C4.

MODELO 1			MODELO 2		
C1	C2	C3	C4	C5	C6
10,0	2,0	50,0	0,0	0,0	20,0
10,0	2,0	50,0	0,5	0,0	20,0
10,0	2,0	50,0	1,0	0,0	20,0
10,0	2,0	50,0	1,5	0,0	20,0

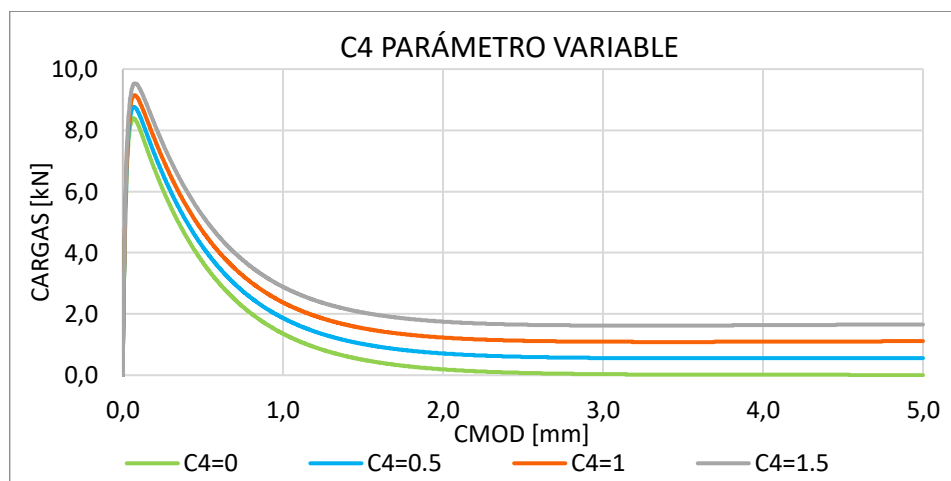


Gráfico N°4: Sensibilidad variando parámetro C4.

Se designan valores cada 0,5 unidades. Se observa en el gráfico que al variar el parámetro C4 afecta directamente en el tramo final de la curva, presentando una constante cuando x se encuentra entre 2 y 5 [mm]

- A mayor C4, el término de la curva es mayor en Y.
- A menor C4, el término de la curva es menor en Y.

- Parámetro C5.

Tabla N°6: Valores para análisis de C5.

MODELO 1			MODELO 2		
C1	C2	C3	C4	C5	C6
10,0	2,0	50,0	1,5	-0,3	20,0
10,0	2,0	50,0	1,5	-0,2	20,0
10,0	2,0	50,0	1,5	0,0	20,0
10,0	2,0	50,0	1,5	0,2	20,0

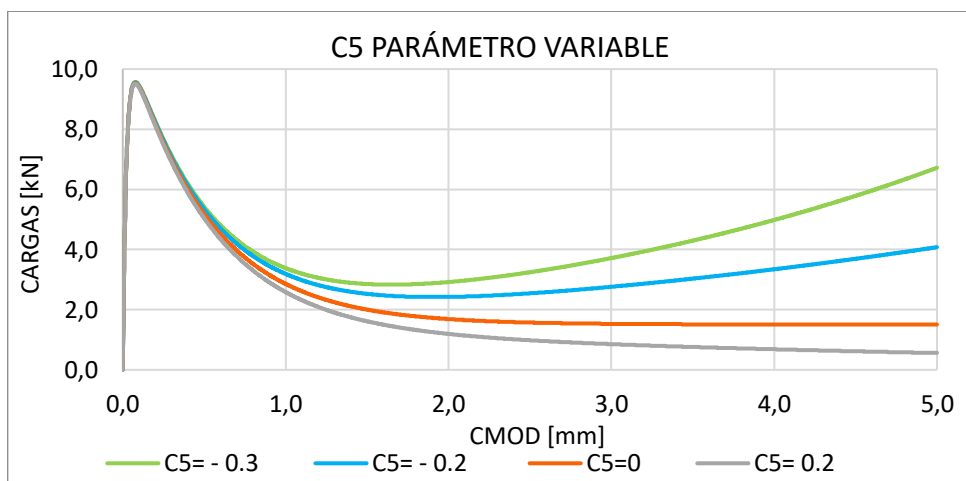


Gráfico N°5: Sensibilidad variando parámetro C5.

Se designan valores entre -0,3 y 0,2 unidades. Se observa en el gráfico que al variar el parámetro C5 de negativo a positivo afecta directamente en la pendiente del tramo final de la curva cuando x se encuentra entre 2 y 5. A mayor magnitud, mayor pendiente.

- Con (+) C5 la pendiente es negativa.
- Con (-) C5 la pendiente es positiva.

- Parámetro C6.

Tabla N°7: Valores para análisis de C6.

MODELO 1			MODELO 2		
C1	C2	C3	C4	C5	C6
10,0	2,0	20,0	2,0	0,0	0,5
10,0	2,0	20,0	2,0	0,0	1,0
10,0	2,0	20,0	2,0	0,0	3,0
10,0	2,0	20,0	2,0	0,0	10,0

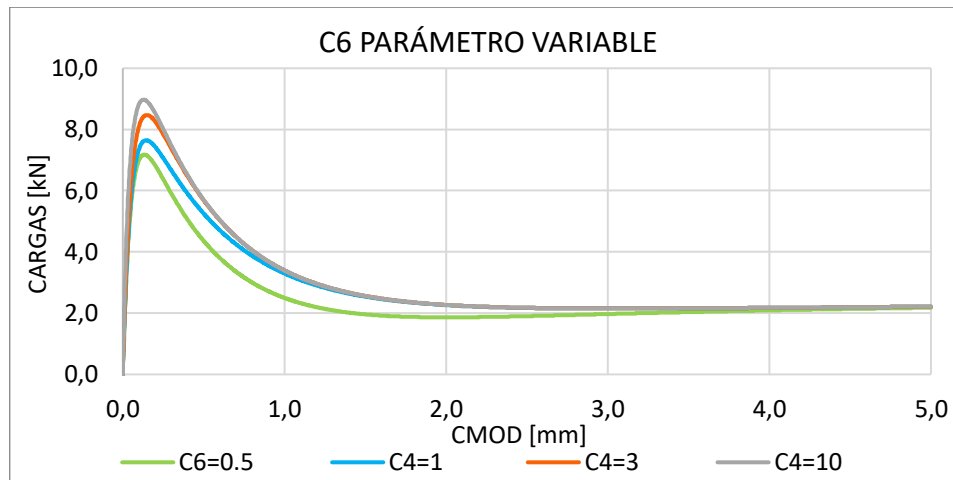


Gráfico N°6: Sensibilidad variando parámetro C6.

Se designan valores entre 0,5 y 10 unidades. Se observa en el gráfico que al variar el parámetro C6 produce un efecto en la curvatura del descenso de la gráfica.

- A mayor C6, más alto pick, provocando mayor curvatura.
- A menor C6, menor pick, provocando menor curvatura.

3 Investigación experimental.

En el siguiente capítulo se describe la investigación experimental desarrollada en LEMCO, UTFSM, Valparaíso, la cual considera; los materiales utilizados, las dosificaciones consideradas, los ajustes realizados al ensayo principal y la obtención de la base de datos a estudiar.

3.1 Materiales.

3.1.1 Cemento.

Para la confección de vigas HRF, se utiliza cemento Polpaico 400 correspondiente a un cemento de grado alta resistencia, que se fabrica bajo la norma chilena Nch148of68 “Cemento, Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales”.

3.1.2 Áridos.

Mediante la molienda conjunta de clínquer, yeso y materiales puzolánicos; los áridos, correspondientes las arena (0-5 mm) y la grava (5-20 mm), fueron extraídos del río Aconcagua.

3.1.3 Aditivos.

El aditivo a utilizar es tipo reductor de agua de alta eficiencia llamado Sika ViscoCrete - 5100 CL. Está basado en polímeros sintéticos que permiten una mayor fluidez de la mezcla, una alta cohesión y es capaz de mantener una buena trabajabilidad de manera prolongada. Según la Nch 2182-2010 es considerado un aditivo super plastificante tipo F.

3.1.4 Fibras BarChip.

El reforzamiento del concreto con fibra sintética BarChip es de polipropileno. Su sistema funciona al distribuir cientos de miles de fibras de alta resistencia a la tracción a través de toda la mezcla de concreto. Ellas refuerzan cada parte de la estructura del concreto, de frente hasta el fondo y de arriba hacia abajo, sin dejar partes vulnerables sin reforzar.

Algunos beneficios de la incorporación de fibras al concreto, son los siguientes:

- Redistribuye las cargas – incrementa ductilidad.
- Elimina la corrosión – durabilidad a largo plazo.
- Reduce costos de mantenimiento y cierres por rehabilitación.
- Elimina la instalación de mallas de acero.
- Mejora la velocidad de producción de prefabricados hasta un 50%

- Incrementa la protección contra la abrasión e impactos.
- Reducción del 70% en huella de carbono, en comparación al acero.
- Más seguro y ligero de manipular que el acero.
- Uso reducido de bombas y brazos de concreto.
- La fibra BarChip está estabilizada para resistir los rayos UV y resistir el deterioro solar.

Propiedades de cada fibra utilizada.

Tabla N°8: Propiedades fibra BarChip 48 (*The Synthetic Fibre Experts, BarChip.Inc*)

Característica	BarChip 48.
Clase de Fibra III	Para uso estructural en hormigón, argamasa y lechada de cemento.
Resistencia a la tensión	640 Mpa
Módulo Young	12 Gpa
Anclaje	Relieve continuo
Material de base	Polipropileno virgen
Resistencia alcalina	Excelente
Longitud	48 mm
Certificado CE	0120 - GB 10/79678
Certificado ISO	44943

Tabla N°9: Propiedades fibra BarChip 50 (*The Synthetic Fibre Experts, BarChip.Inc*)

Característica	BarChip 50.
Clase de Fibra III	Para uso estructural en hormigón, argamasa y lechada de cemento.
Resistencia a la tensión	610 Mpa
Módulo Young	10 Gpa
Anclaje	Relieve continuo
Material de base	Polipropileno virgen y reciclado
Resistencia alcalina	Excelente
Longitud	48 mm
Certificado CE	
Certificado ISO	44943

Tabla N°10: Propiedades fibra BarChip 54 (*The Synthetic Fibre Experts, BarChip.Inc*)

Característica	BarChip 54
Clase de Fibra III	Para uso estructural en hormigón, argamasa y lechada de cemento.
Resistencia a la tensión	640 Mpa
Módulo Young	12 Gpa
Anclaje	Relieve continuo
Material de base	Polipropileno virgen
Resistencia alcalina	Excelente
Longitud	54 mm
Certificado CE	0120 – GB 10/79678

3.2 Dosificaciones.

Considerando la mezcla de los materiales anteriormente señalados, se presenta la siguiente tabla con las cantidades utilizadas de cada material.

Tabla N°11: Dosificación de la mezcla de HRF.

Material	[kg/m ³]				
Fibra BC	0	2	4	6	8
Cemento	387	387	387	387	387
Arena fina	120	120	120	120	120
Arena gruesa	813	813	813	813	813
Gravilla	947	947	947	947	947
Agua	147	147	147	147	147
Aditivo	1333	1333	1333	1333	1333

3.3 Ensayo al corte diagonal de vigas de HRF.

Las vigas son agrupadas según el tipo de fibra y dosificación que posean.

Para determinar la resistencia al corte diagonal de las vigas, éstas deben ser sometidas a flexión, para ello se utilizan vigas de 75x150x600 mm con entallas excéntricas, la cual se ubica a 100 mm del centro con una profundidad de 50 mm para poder generar una grieta en diagonal (45°).

La viga es instalada en los apoyos a 100 mm de cada borde generando una luz de 400 mm, con la carga central y un transductor capaz de monitorear la apertura de la grieta, como se muestra en la Ilustración N°8.

Es importante que el transductor esté bien posicionado para evitar datos erróneos una vez iniciado el ensayo.

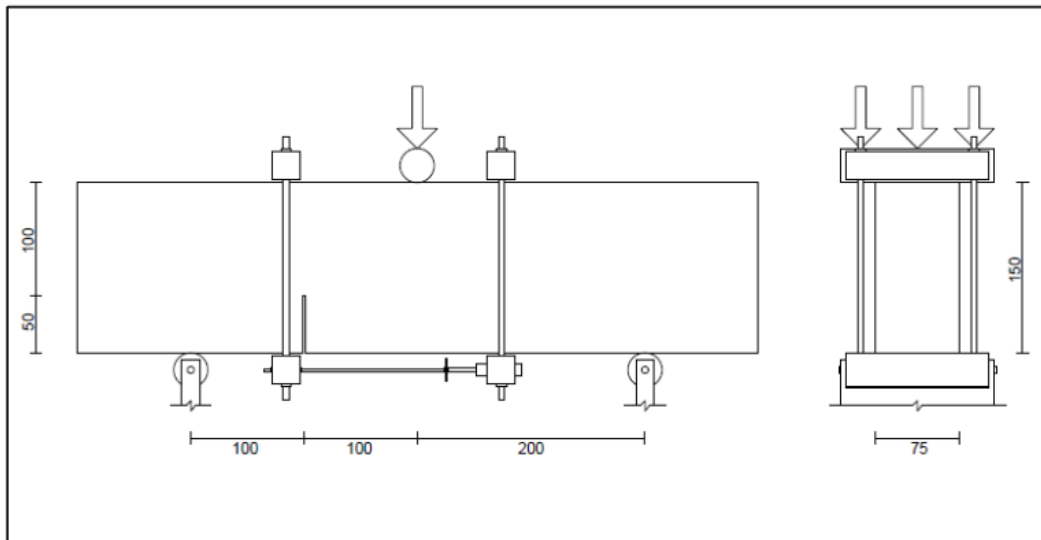


Ilustración N°10: Configuración ensayo al corte diagonal (LEMCO UTFSM, Chile)

Comienza el ensayo con una velocidad inicial constante de $0,3 \mu\text{m/s}$ hasta que disminuye un 25% de la carga máxima alcanzada, luego se va aumentando $0,25 \mu\text{m/s}$ cada 2 [min]. El ensayo se da por finalizado cuando se alcanza una velocidad de $5 \mu\text{m/s}$ o cuando la viga colapse. Mediante el programa MCC8 Multitest se genera la base de datos a analizar.



Ilustración N°11: Ensayo al corte diagonal (LEMCO UTFSM, Chile).

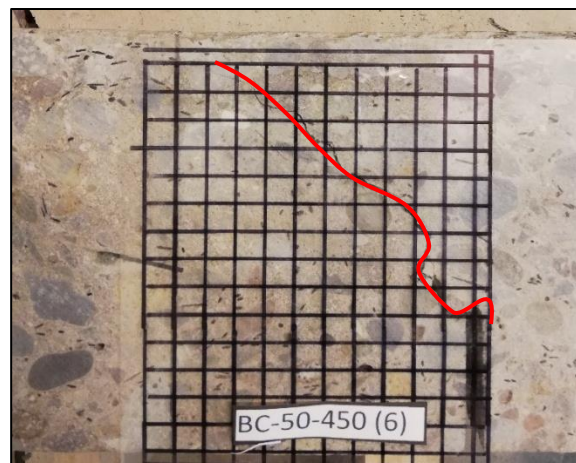


Ilustración N°12: Grieta de viga sometida a carga (LEMCO UTFSM, Chile).

4 Análisis de Resultados.

En el siguiente capítulo se presentan los datos obtenidos y los gráficos carga – deformación de cada viga sometida al ensayo.

De cada grupo de vigas, se consideran 3 para el estudio. La selección se basa en 2 consideraciones:

1. El gráfico de la viga no debe alejarse más de 1 [kN], en las ordenadas, del gráfico promedio de todas las vigas del lote.
2. Los resultados deben ser coherentes con el ensayo realizado, por lo que no se consideran las vigas que colapsaron previo a alcanzar los 5 [μm].

Con las vigas seleccionadas se obtiene el promedio del grupo de vigas “BC XX – Y [kg/m³]”, con los cuales se determina el gráfico representativo para “XX” tipo de fibra e “Y” dosificación.

4.1 Resistencia al corte – Vigas HRF.

A continuación, se presentan los gráficos cargas - deformación de las vigas seleccionadas y el promedio de cada lote.

4.1.1 HO.

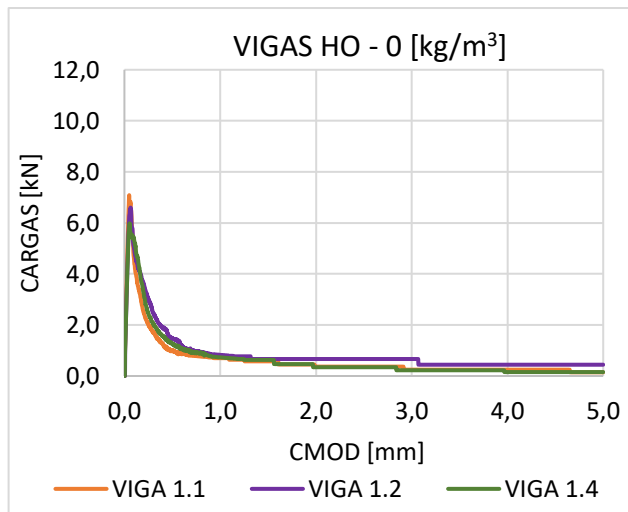


Gráfico N°7: Vigas HO – 0 [kg/m³]

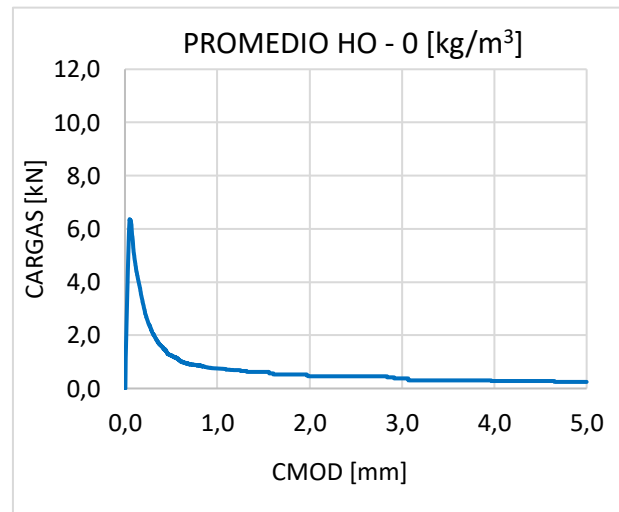


Gráfico N°8: Promedio vigas HO – 0 [kg/m³]

4.1.2 BC 48.

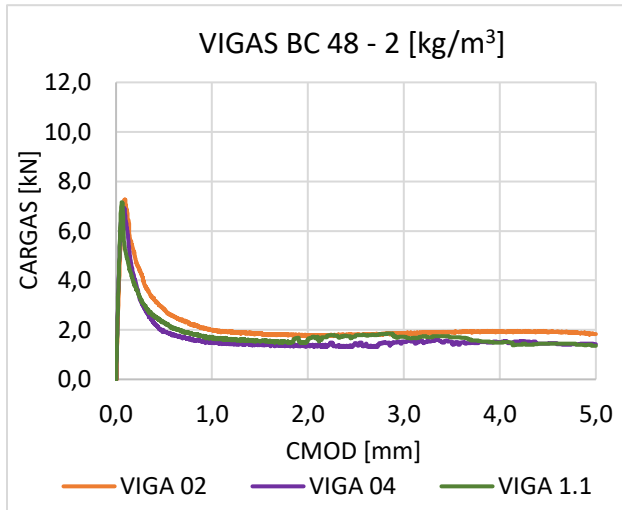


Gráfico N°9: Vigas BC 48 – 2 [kg/m³]

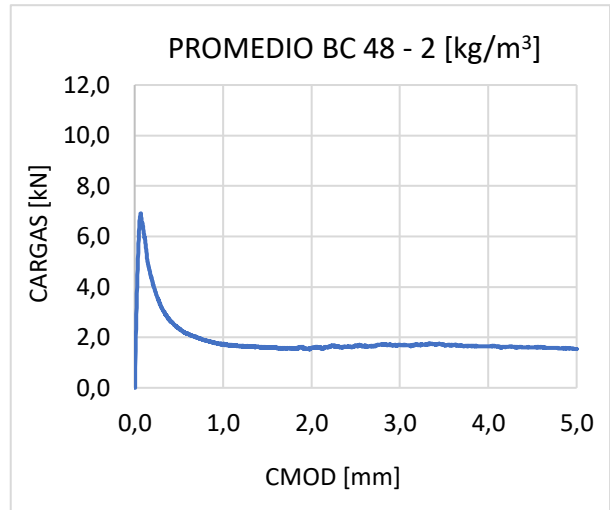


Gráfico N°10: Promedio vigas BC 48 – 2 [kg/m³]

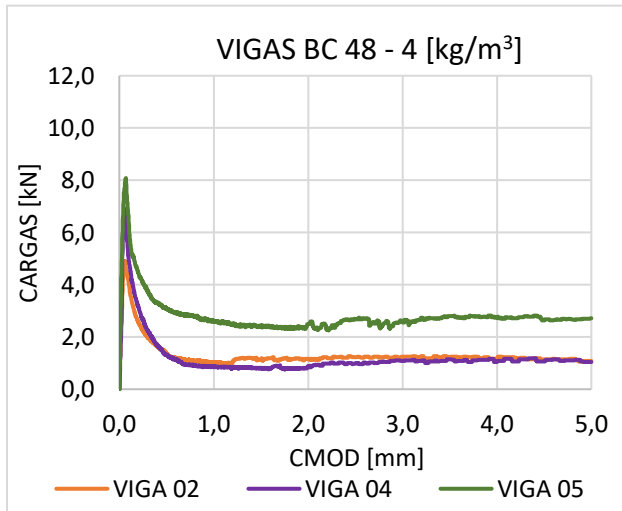


Gráfico N°11: Vigas BC 48 – 4 [kg/m³]

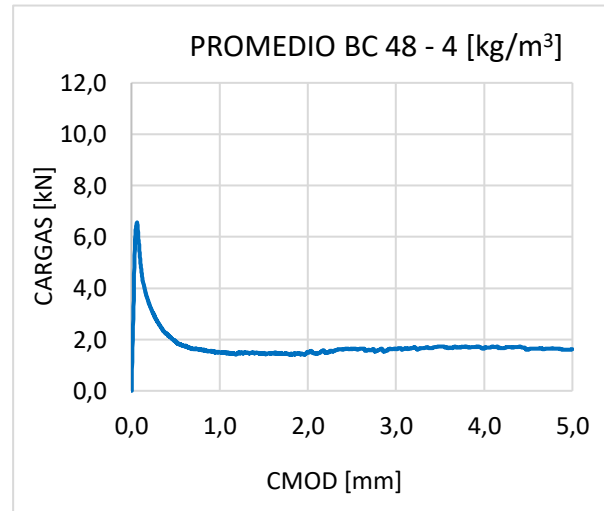


Gráfico N°12: Promedio vigas BC 48 – 4 [kg/m³]

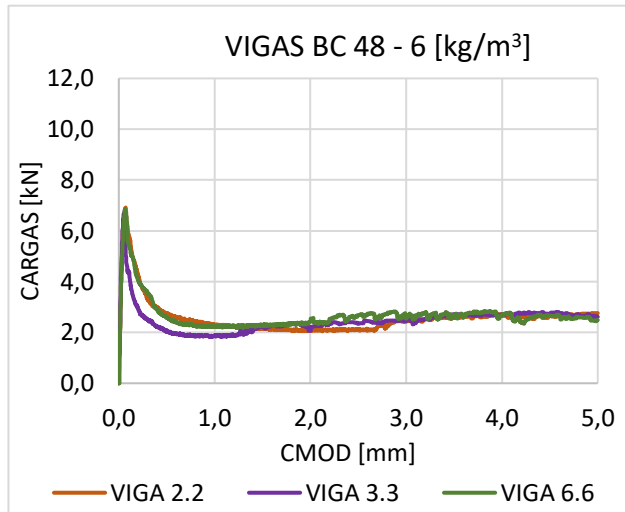


Gráfico N°13: Vigas BC 48 – 6 [kg/m³]

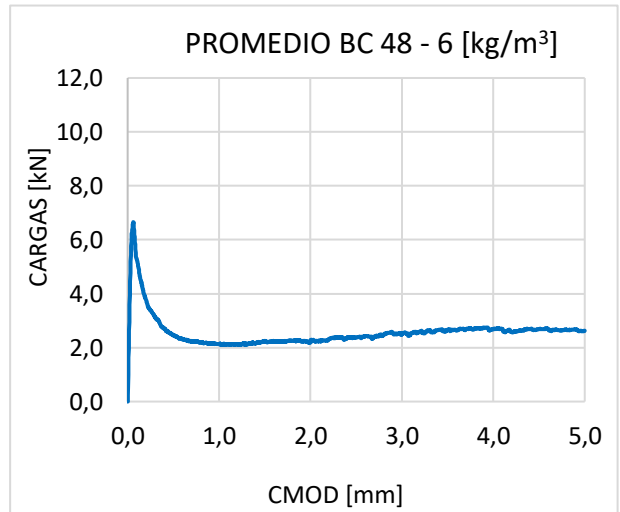


Gráfico N°14: Promedio viga BC 48 – 6 [kg/m³]

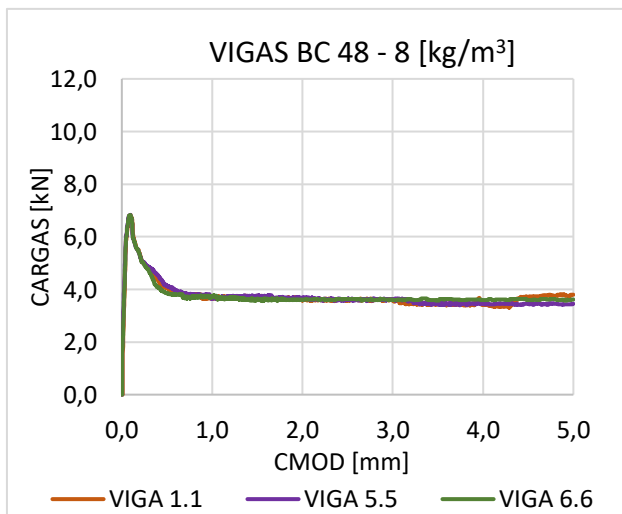


Gráfico N°15: Vigas BC 48 – 8 [kg/m³]

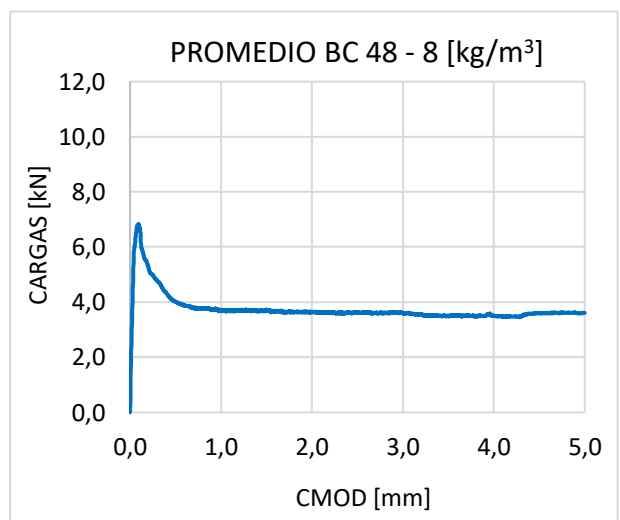


Gráfico N°16: Promedio viga BC 48 – 8 [kg/m³]

4.1.3 BC 50

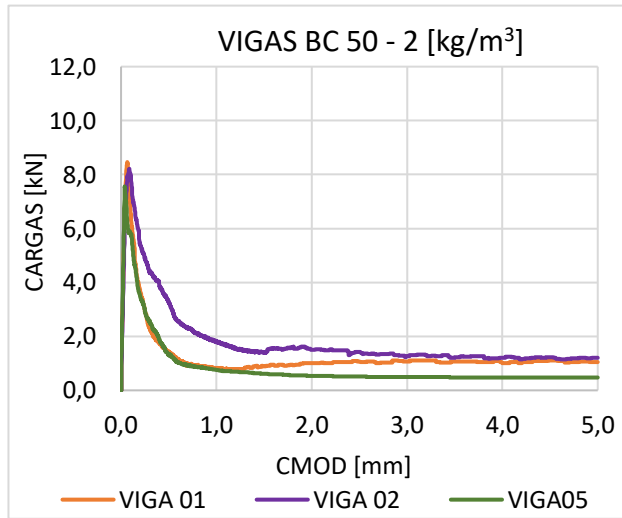


Gráfico N°17: Vigas BC 50 – 2 [kg/m³]

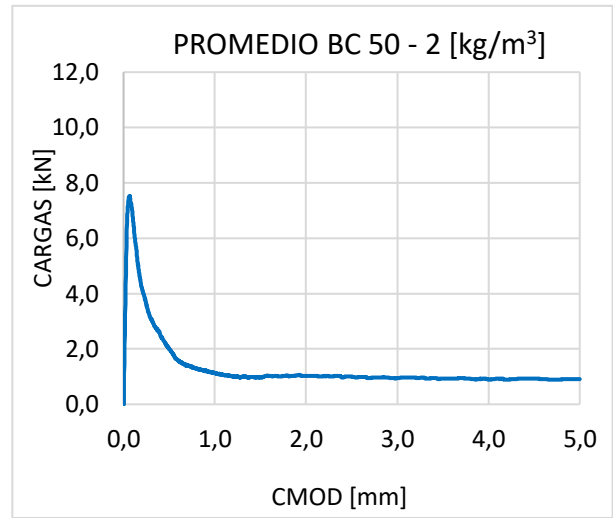


Gráfico N°18: Promedio viga BC 50 – 2 [kg/m³]

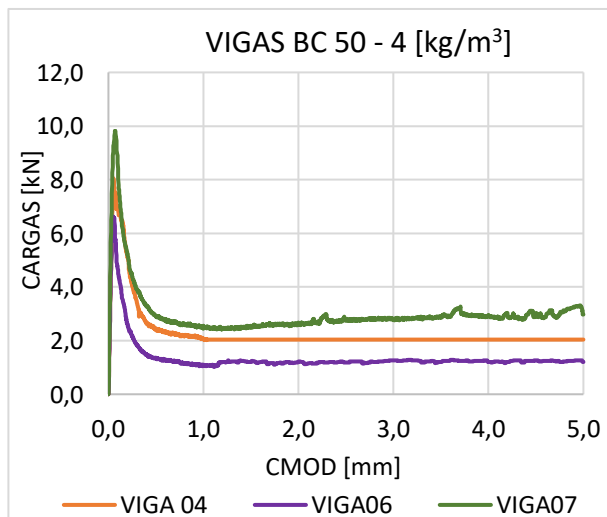


Gráfico N°19: Vigas BC 50 – 4 [kg/m³]

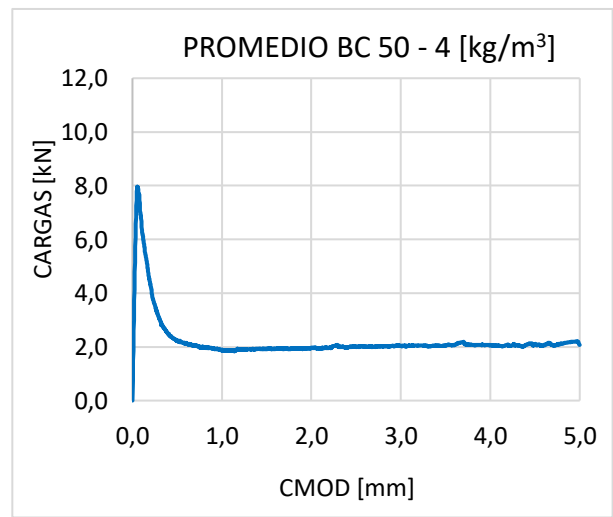


Gráfico N°20: Promedio viga BC 50 – 4 [kg/m³]

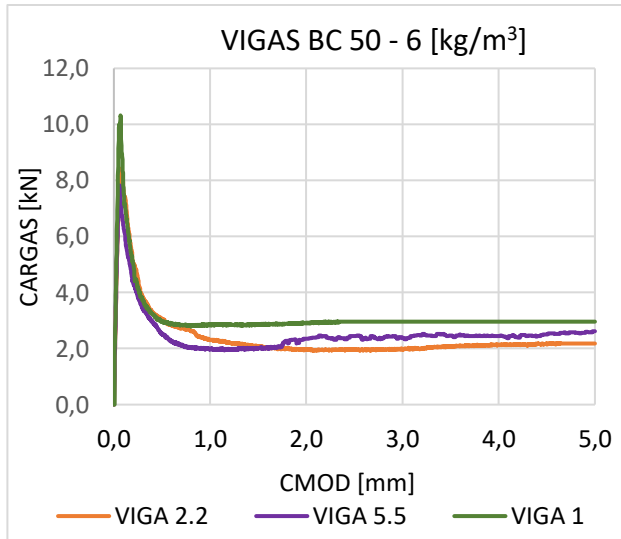


Gráfico N°21: Vigas BC 50 – 6 [kg/m³]

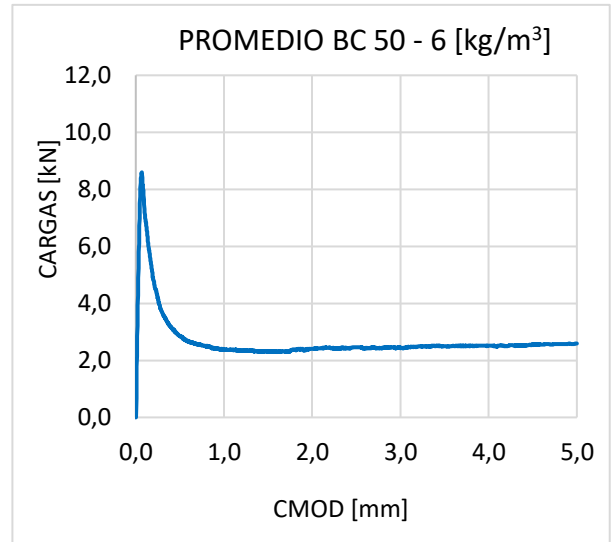


Gráfico N°22: Promedio vigas BC 50 – 6 [kg/m³]

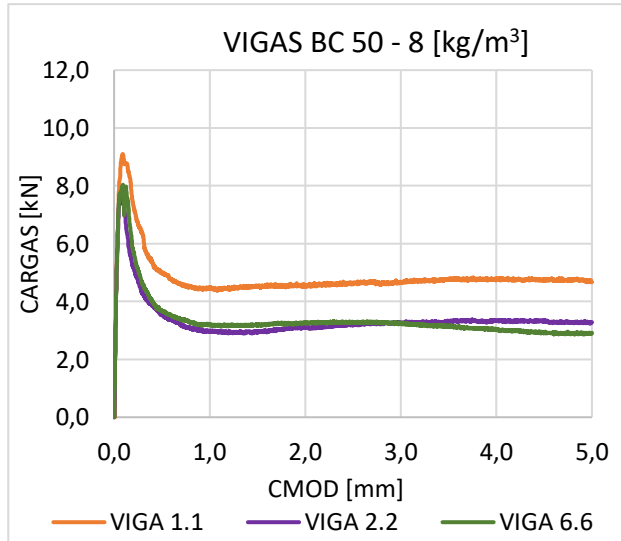


Gráfico N°23: Vigas BC 50 – 8 [kg/m³]

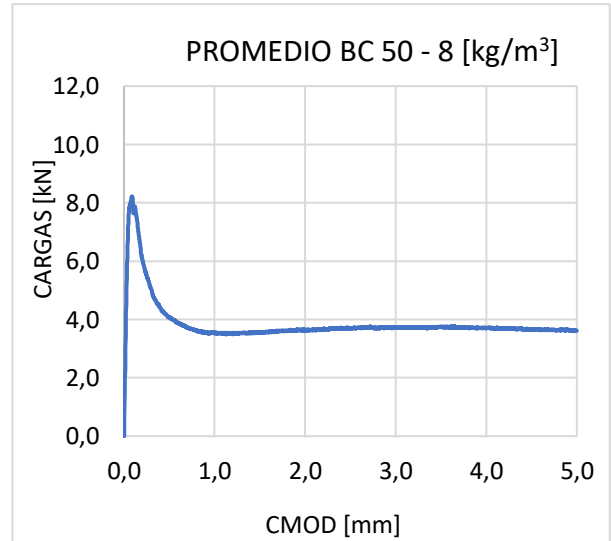


Gráfico N°24 Promedio vigas BC 50 – 8 [kg/m³]

4.1.4 BC 54

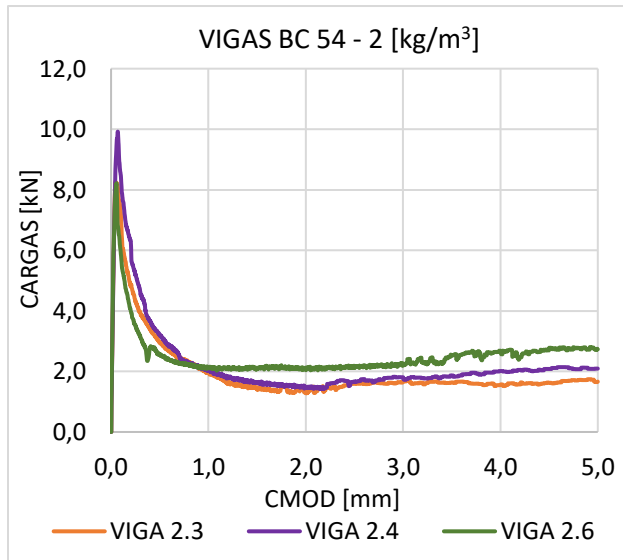


Gráfico N°25: Vigas BC 54 – 2 [kg/m³]

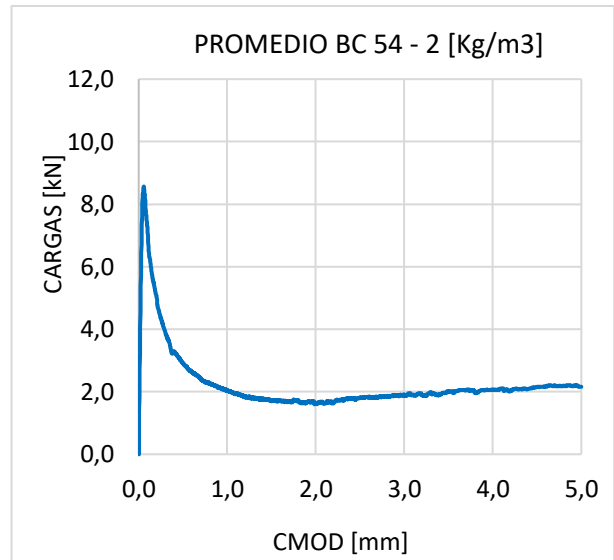


Gráfico N°26: Promedio vigas BC 54 – 2 [kg/m³]

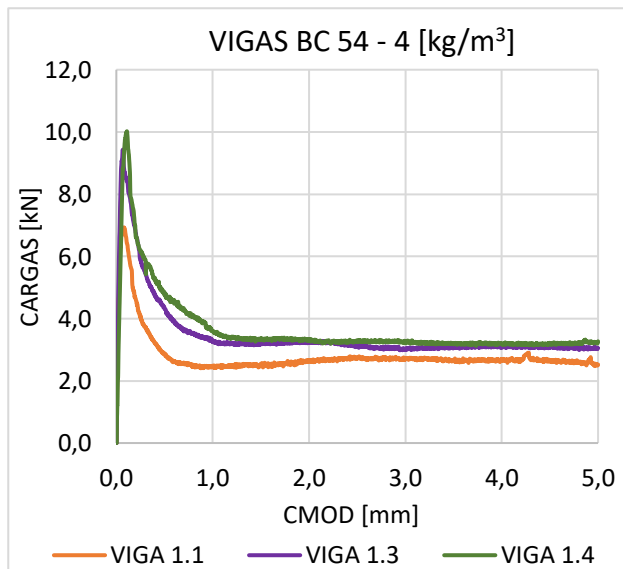


Gráfico N°27: Vigas BC 54 – 4 [kg/m³]

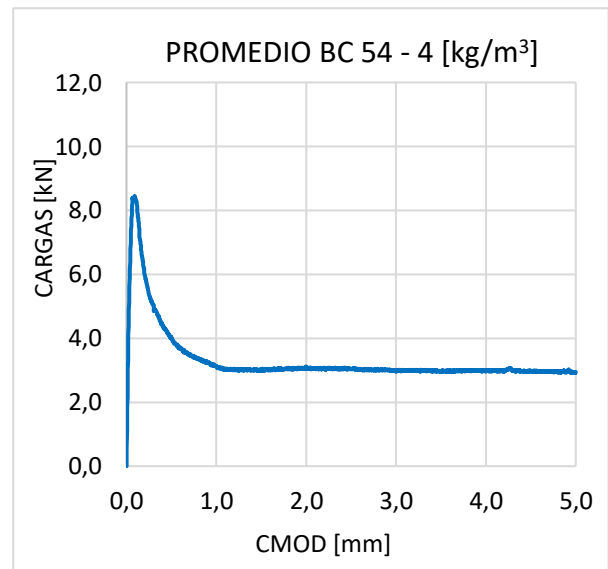


Gráfico N°28: Promedio vigas BC 54 – 4 [kg/m³]

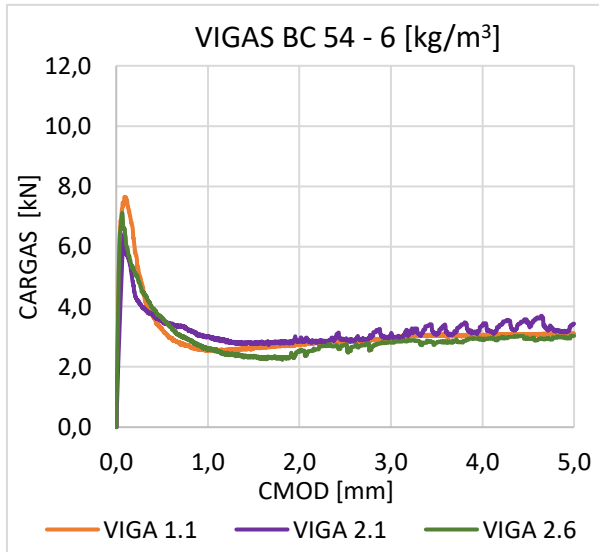


Gráfico N°29: Vigas BC 54 – 6 [kg/m³]

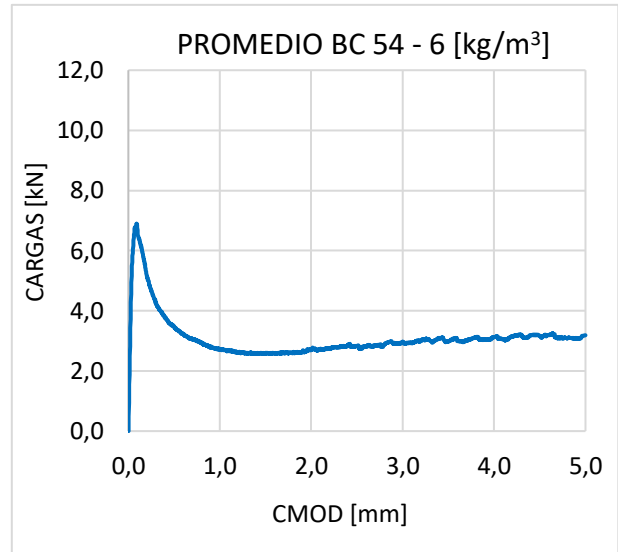


Gráfico N°30: Promedio vigas BC 54 – 6 [kg/m³]

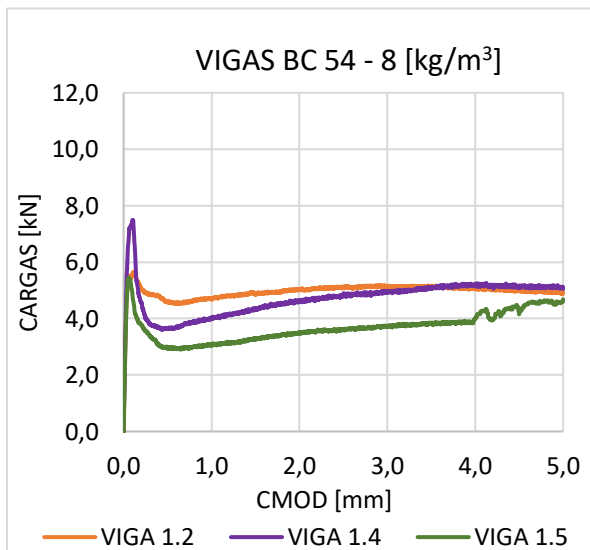


Gráfico N°31: Vigas BC 54 – 8 [kg/m³]

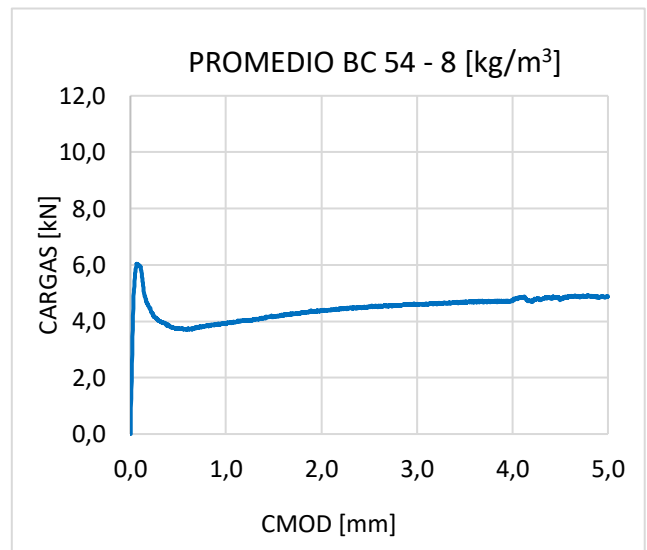


Gráfico N°32: Promedio vigas BC 54 – 8 [kg/m³]

4.2 Modelo exponencial – Parámetros.

El siguiente capítulo presenta los valores propuestos para los diferentes tipos de vigas ensayadas. A modo consideración, se estipula un margen de tolerancia para la investigación de $\pm 5\%$ en cuanto a valores experimentales (laboratorio) y teóricos (modelo exponencial)

Para poder determinar los valores de cada parámetro, se realizó una iteración con posibles datos que, al ir graficando, generan una mejor visualización de la gráfica representativa de cada lote.

En un principio la búsqueda de los valores se realizó mediante XLStat, pero no se logró determinar valores que, al graficar, fuesen semejantes a la curva promedio de las vigas, por lo cual se optó por la iteración manual.

Como se describió en el capítulo “2.6.3 Comportamiento de los parámetros”, cada constante posee su función, y todos ajustan o mueven en ambos ejes la curva, por lo que la iteración, se realiza cambiando todos los parámetros, de manera tal, de poder encontrar semejanzas o diferencias en los valores y poder interpretarlos en base a los distintos tipos de fibra y/o dosificaciones.

La modelación de la curva promedio está basada en las siguientes funciones:

$$\text{Modelo 1: } y = C_1 (e^{-C_2 x} - e^{-C_3 x}) \quad (3)$$

$$\text{Modelo 2: } y = C_4 (e^{-C_5 x} - e^{-C_6 x}) \quad (4)$$

Determinando los parámetros, se realiza una superposición de los modelos, tal como lo indica la fórmula (2) del capítulo “2.6.2 Modelo de cuatro – e “:

$$\text{Superposición} = \text{Modelo 1} + \text{Modelo 2}$$

El objetivo es que, al graficar la superposición de los modelos, la curva generada sea lo más cercana posible a la representativa de cada lote de vigas.

4.2.1 HO.

Para la modelación de la curva promedio carga- deformación de las vigas de hormigón (sin fibras), se propone la siguiente función:

$$y = 10,5(e^{-8,5x} - e^{-40x}) + 1,15(e^{-(-0,34)x} - e^{-25x}) \quad (5)$$

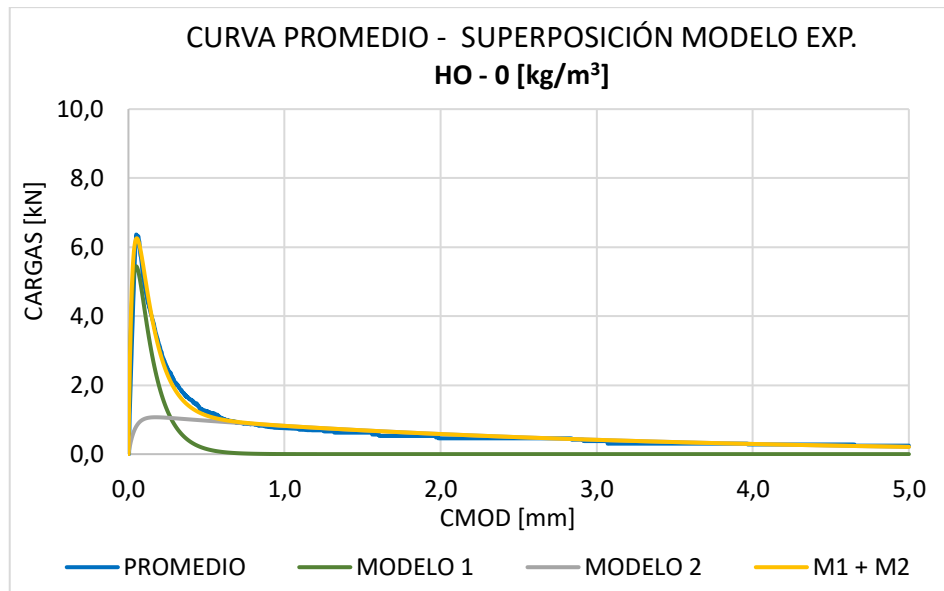


Gráfico N°33: Modelo exponencial HO – 0 [kg/m³]

La curva promedio tiene un alcance máximo en Y de 6,37 [kN] (valor experimental) mientras que el modelo propuesto alcanza 6,26 [kN] (valor teórico) dejando un margen de error de -1,7%, lo cual está dentro del margen de tolerancia permitido para la investigación ($\pm 5\%$).

Considerando que previo a alcanzar el máximo de carga, es evaluado el hormigón, se puede observar posteriormente que la curva decae y genera una pendiente negativa, lo cual es coherente con el estudio de este tipo de viga ya que no poseen fibras, por lo cual, no hay un comportamiento postfisuración que comprometa una mayor resistencia al corte de las vigas.

4.2.2 BC 48

Para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 48 – 2 [kg/m³] se propone la siguiente función:

$$y = 8,8(e^{-4x} - e^{-50x}) + 1,35(e^{-(-0,065)x} - e^{-5x}) \quad (6)$$

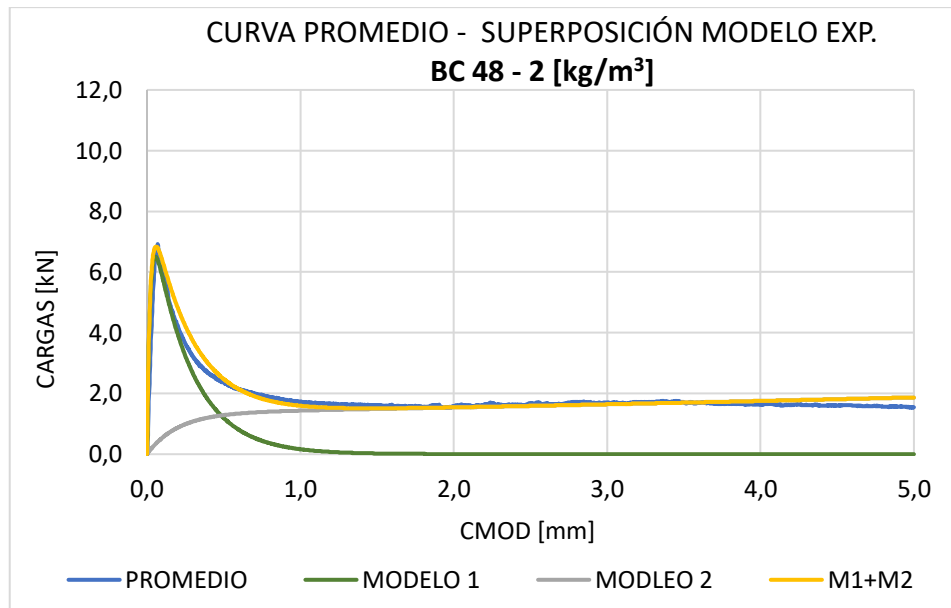


Gráfico N°34: Modelo exponencial BC 48 – 2 [kg/m³]

Para este caso, la curva promedio tiene un alcance máximo en Y de 6,91 [kN], y el modelo propuesto alcanza 6,84 [kN], dejando un margen de error de -1,08 %.

Se logra observar que se produce un levantamiento de la curva en su último tramo cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm], ello teóricamente se interpreta como contribución de fibras en la mezcla, alcanzando un máximo promedio en Y de 1,73 [kN].

Se debe tener en consideración que este lote de vigas BC 48 es el que posee menor cantidad de fibras, por lo cual, para definir mejor su comportamiento gráfico, debe compararse con las otras dosificaciones.

Se propone la siguiente función para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 48 – 4 [kg/m³]:

$$y = 9(e^{-5,5x} - e^{-50x}) + 1,4(e^{-(-0,05)x} - e^{-5x}) \quad (7)$$

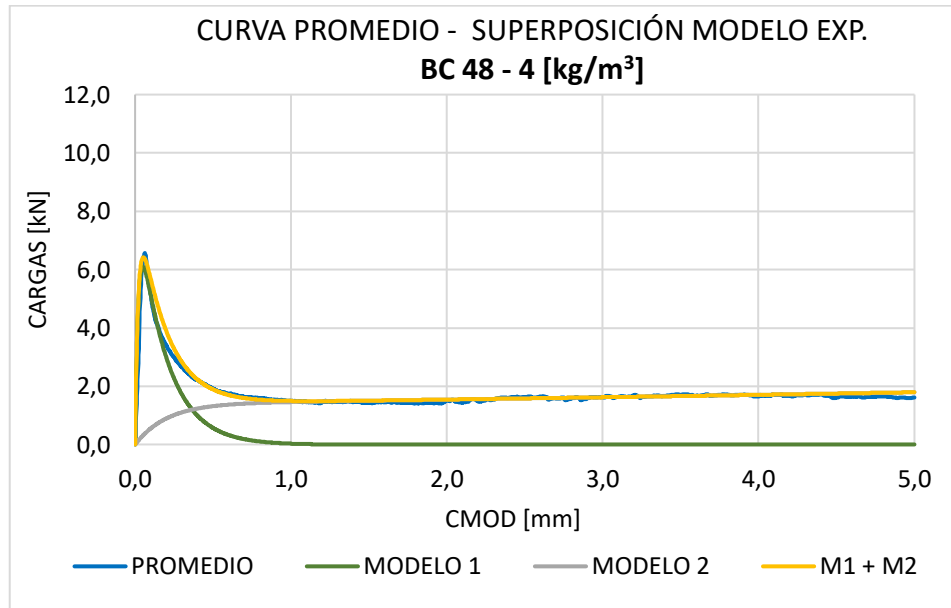


Gráfico N°35: Modelo exponencial BC 48 – 4 [kg/m³]

La carga máxima alcanzada por la curva promedio en Y es de 6,56 [kN], mientras que el modelo propuesto alcanza 6,42 [kN], al hacer la comparación existe un margen de error de -2,2 %.

Se puede observar que se produce un leve levantamiento de la curva en su último tramo cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm], ello teóricamente se interpreta como contribución de fibras en la mezcla, alcanzando un máximo promedio en Y de 1,74 [kN].

En cuanto a la función propuesta, el parámetro que provoca el levantamiento en el último tramo es C5, el cual es aumentado en un 23% pasando de -0,065 a -0,05 para dosificaciones de 2 a 4 [kg/m³], respectivamente.

Para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 48 – 6 [kg/m³], se propone la siguiente función:

$$y = 9,2(e^{-6x} - e^{-50x}) + 2,25(e^{-(-0,03)x} - e^{-5x}) \quad (8)$$

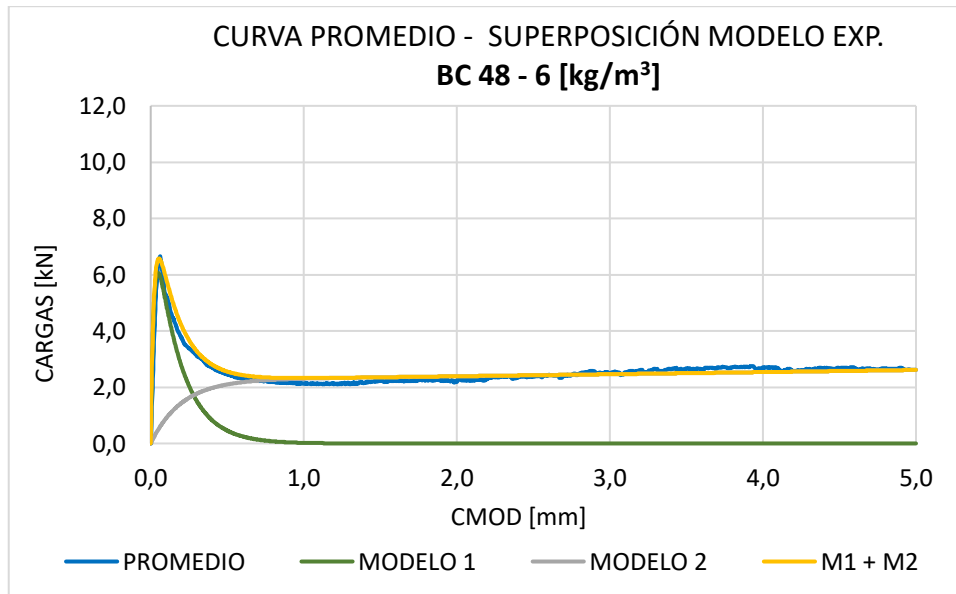


Gráfico N°36: Modelo exponencial BC 48 – 6 [kg/m³]

La curva promedio tiene una carga máxima de 6,65 [kN] (valor experimental) mientras que el modelo propuesto alcanza 6,57 [kN] (valor teórico), dejando un margen de error de -1,27 %.

Para este caso se puede ver un aumento en la pendiente del último tramo de la curva, el cual se hace más positivo cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm]. Este levantamiento se atribuye al aumento en la dosificación de las fibras, lo que provoca una mayor resistencia al corte de la viga, logrando un 2° pick de 2,75 [kN].

En cuanto a la función propuesta, el parámetro que provoca el levantamiento en el último tramo se ve aumentado en un 40% pasando de -0,05 a -0,03 para dosificaciones de 4 a 6 [kg/m³] respectivamente.

Se propone la siguiente función para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 48 – 8 [kg/m³]:

$$y = 9,4(e^{-6,5x} - e^{-50x}) + 4(e^{-0,035x} - e^{-5x}) \quad (9)$$

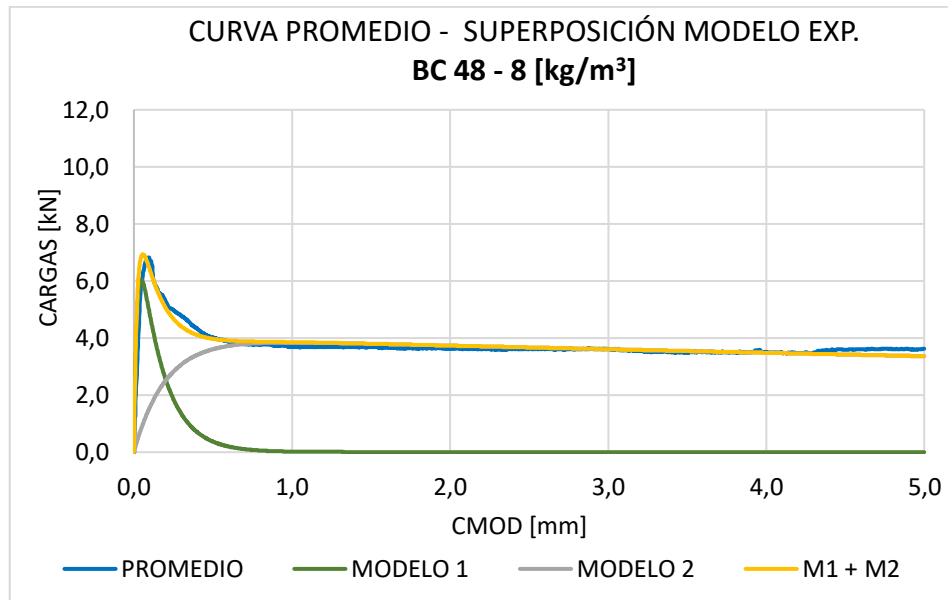


Gráfico N°37: Modelo exponencial BC 48 – 8 [kg/m³]

Estas vigas son las con mayor cantidad de fibra, su curva promedio tiene una carga máxima de 6,83 [kN] y el modelo propuesto alcanza 6,93 [kN], difiriendo en 1,49 %.

Para este caso se puede ver un aumento en el 2° pick del gráfico promedio, alcanzado un 3,66 [kN] cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm].

En cuanto a la función propuesta, el parámetro que provoca el levantamiento en el último tramo se ve aumentado significativamente pasando de -0,03 a 0,035 para dosificaciones de 6 a 8 [kg/m³], respectivamente, lo que deja en evidencia la contribución del aumento en dosificación de las fibras ante la resistencia al corte.

4.2.3 BC 50

Se propone la siguiente función para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 50 – 2 [kg/m³]:

$$y = 9(e^{-4,3x} - e^{-75x}) + 0,9(e^{-(-0,02)x} - e^{-15x}) \quad (10)$$

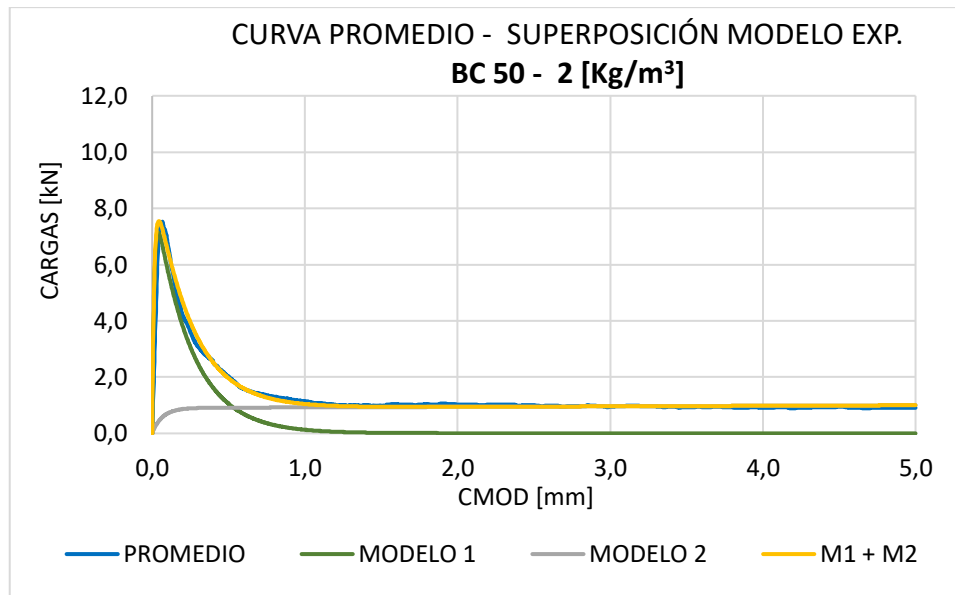


Gráfico N°38: Modelo exponencial BC 50 – 2 [kg/m³]

Para este caso, la curva promedio alcanza una carga máxima de 7,52 [kN], y el modelo propuesto 7,55 [kN], dejando un margen de error de 0,37 %.

Se observa que, en el último tramo de la curva, cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm], se produce una constante $y = 1,03$ [kN], lo cual se interpreta como la contribución de la fibra en la mezcla, que, para este caso, es esperable ya que la cantidad de fibra es la más baja de las dosificaciones utilizadas.

Para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 50 – 4 [kg/m³] se propone la siguiente función:

$$y = 9,5(e^{-6,2x} - e^{-75x}) + 1,9(e^{-(-0,018)x} - e^{-15x}) \quad (11)$$

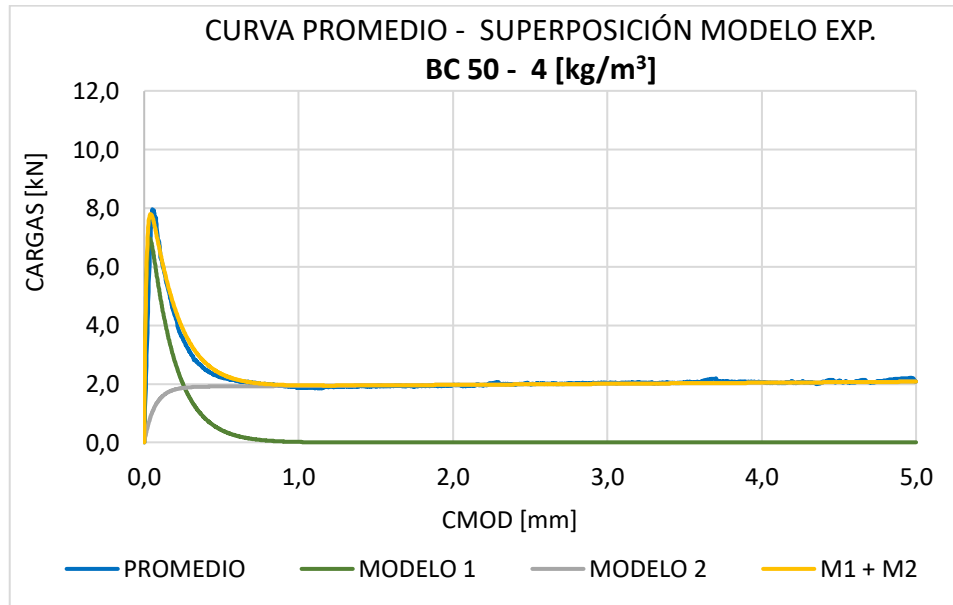


Gráfico N°39: Modelo exponencial BC 50 – 4 [kg/m³]

La carga máxima alcanzada por la curva promedio en Y es de 7,96 [kN], mientras que el modelo propuesto alcanza 7,80 [kN], al hacer la comparación existe un margen de error de -2,02 %.

Gráficamente se produce un leve levantamiento de la curva en su último tramo cuando CMOD se encuentra entre 3 y 5 [mm], reflejando la contribución de la fibra a la resistencia al corte de la viga. Si bien, la pendiente generada es pequeña, se determina un 2° pick en la curva correspondiente a 2,21 [kN].

Respecto a la función propuesta, el parámetro que provoca el leve levantamiento en el último tramo es el C5, el cual es aumentado en un 10% pasando de -0,02 a -0,018 para dosificaciones de 2 a 4 [kg/m³], respectivamente.

Se propone la siguiente función para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 50 – 6 [kg/m³]:

$$y = 10,2(e^{-6,2x} - e^{-75x}) + 2,35(e^{-(-0,015)x} - e^{-15x}) \quad (12)$$

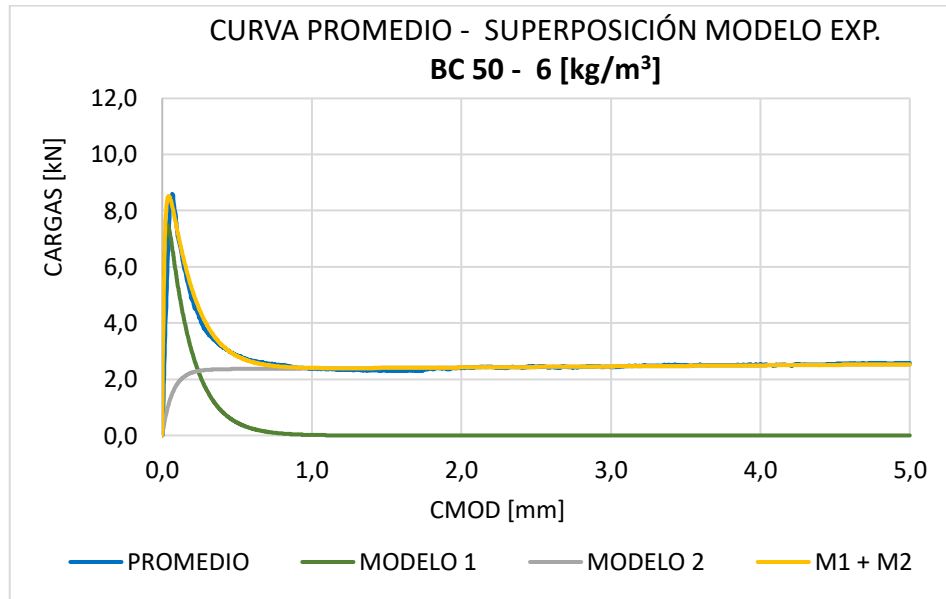


Gráfico N°40: Modelo exponencial BC 50 – 6 [kg/m³]

La curva promedio alcanza una carga máxima de 8,59 [kN] mientras que el modelo propuesto alcanza 8,53 [kN], dejando un margen de error de -0,84 %, lo cual está dentro del margen de tolerancia permitido.

Para este caso se puede ver un aumento en la pendiente del último tramo de la curva, el cual se hace más positivo cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm]. Este levantamiento se atribuye al aumento en la dosificación de las fibras, lo que provoca una mayor resistencia al corte de la viga, logrando un 2° pick de 2,59 [kN].

En cuanto a la función propuesta, el parámetro que provoca el levantamiento en el último tramo se ve aumentado en un 17% pasando de -0,018 a -0,015 para dosificaciones de 4 a 6 [kg/m³], respectivamente.

Para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 50 – 8 [kg/m³] se propone la siguiente función:

$$y = 8,5(e^{-5,5x} - e^{-75x}) + 3,5(e^{-(-0,015)x} - e^{-15x}) \quad (13)$$

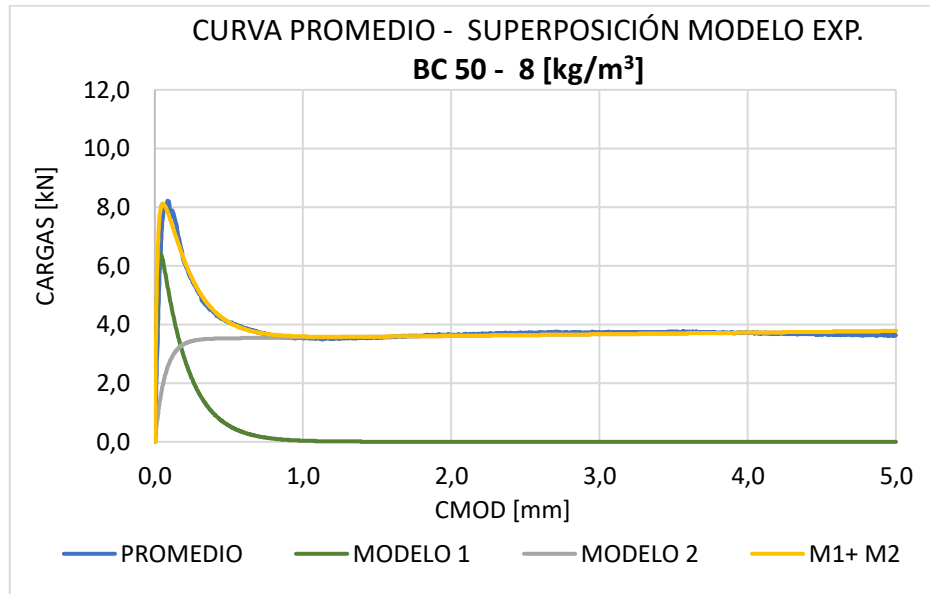


Gráfico N°41: Modelo exponencial BC 50 – 8 [kg/m³]

Estas vigas son las con mayor cantidad de fibra, su curva promedio tiene una carga máxima de 8,21 [kN] y el modelo propuesto alcanza 8,11 [kN], difiriendo en -1,19 %.

Para este caso se puede ver un considerable aumento en el 2° pick del gráfico promedio, alcanzado un 3,77 [kN] cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm].

En cuanto a la función propuesta, el parámetro que provoca la pendiente en el último tramo no se ve afectado manteniendo un valor de -0,015, sin embargo, el parámetro que permite que suba o baje en Y la curva (C4), aumenta su valor en un 50%, pasando de 2,35 a 3,5 cuando son vigas de 6 y 8 [kg/m³], respectivamente.

4.2.4 BC 54

Se propone la siguiente función para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 54 – 2 [kg/m³]:

$$y = 9(e^{-3,8x} - e^{-100x}) + 1,6(e^{-(-0,06)x} - e^{-25x}) \quad (14)$$

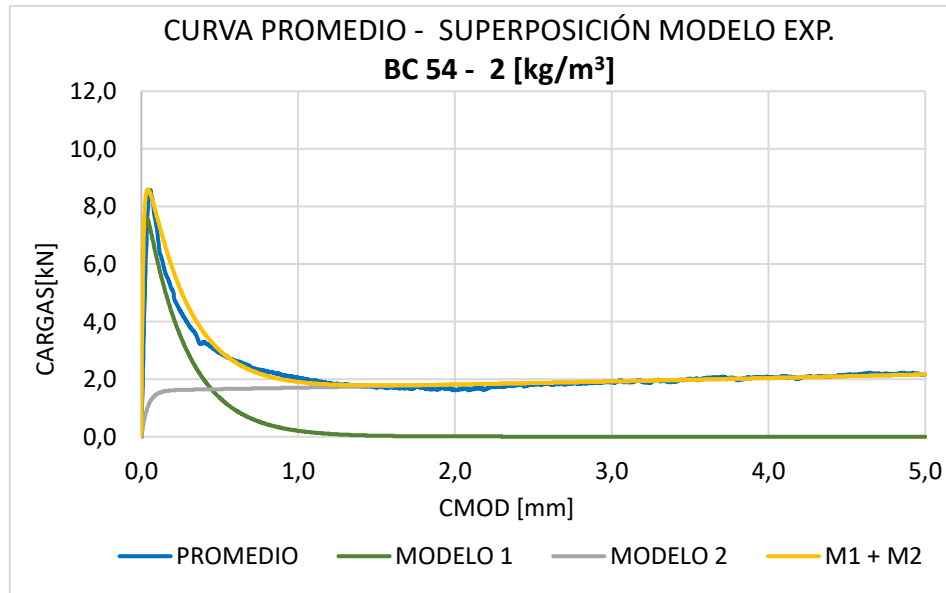


Gráfico N°42: Modelo exponencial BC 54 – 2 [kg/m³]

Para este caso, la curva promedio tiene un alcance máximo en Y de 8,57 [kN], y el modelo propuesto alcanza 8,58 [kN], dejando un margen de error de 0,15 %, lo cual está dentro del margen de tolerancia permitido para la investigación ($\pm 5\%$).

Se logra observar que se produce un levantamiento de la curva en su último tramo cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm], ello teóricamente se interpreta como contribución de fibras en la mezcla, alcanzando un máximo promedio en Y de 2,21 [kN].

Se debe tener en consideración que este lote de vigas BC 54 es el que posee menor cantidad de fibras, por lo cual, para definir mejor su comportamiento gráfico, debe compararse con las otras dosificaciones.

Para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 54 – 4 [kg/m³], se propone la siguiente función:

$$y = 7,8(e^{-4x} - e^{-100x}) + 3(e^{-0x} - e^{-25x}) \quad (15)$$

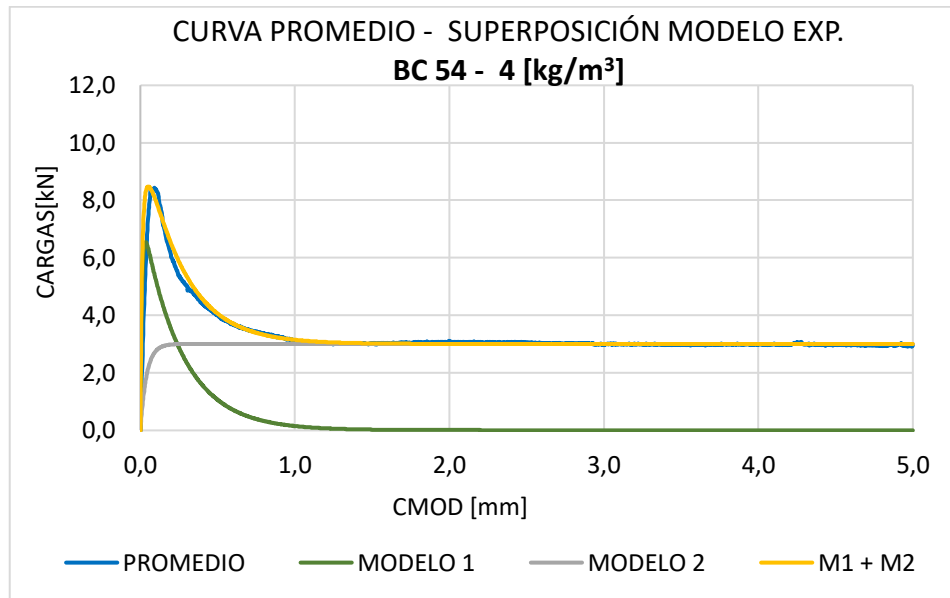


Gráfico N°43: Modelo exponencial BC 54 – 4 [kg/m³]

La carga máxima alcanzada por la curva promedio en Y es de 8,44 [kN], mientras que el modelo propuesto alcanza 8,47 [kN], al hacer la comparación existe un margen de error de 0,42 %.

Gráficamente se produce un levantamiento de la curva en las abscisas, el parámetro que provoca esa acción es C4, el cual aumenta un 50% aproximadamente, iniciando en 1,6 para la dosificación 2 [kg/m³] a 3 para 4 [kg/m³], todo ello cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm].

En cuanto a la pendiente del último tramo, ésta no posee inclinación ya que el parámetro que regula esta acción es C5=0.

Para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 54 – 6 [kg/m³], se propone la siguiente función:

$$y = 6,4(e^{-4,2x} - e^{-100x}) + 2,4(e^{-(-0,06)x} - e^{-25x}) \quad (16)$$

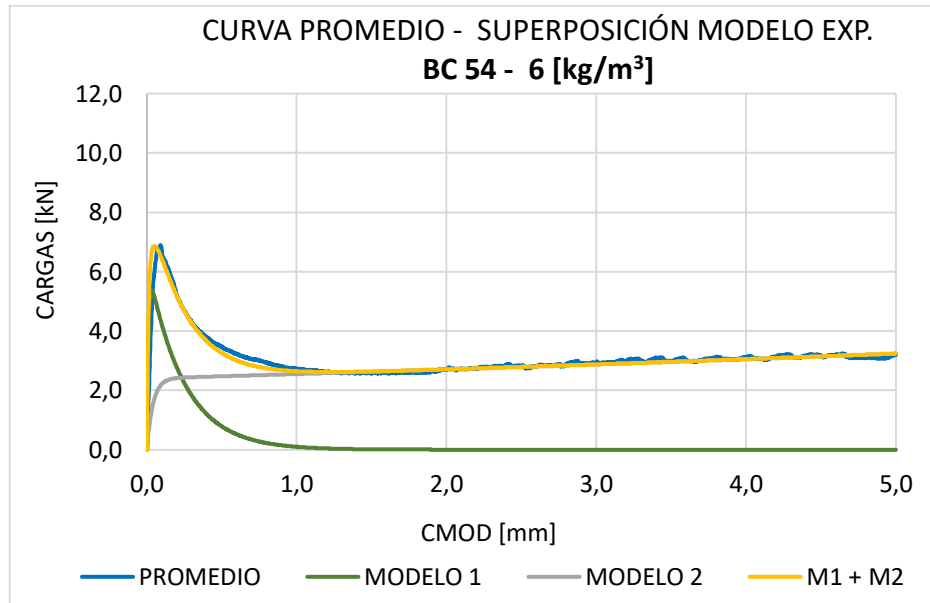


Gráfico N°44: Modelo exponencial BC 54 – 6 [kg/m³]

La curva promedio alcanza una carga máxima de 6,89 [kN] mientras que el modelo propuesto alcanza 6,86 [kN], dejando un margen de error de -0,46 %.

Para este caso se puede ver un aumento en la pendiente del último tramo de la curva, el cual se hace más positivo cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm]. Este levantamiento se atribuye al aumento en la dosificación de las fibras, lo que provoca una mayor resistencia al corte de la viga, logrando un 2° pick de 3,25 [kN].

En cuanto a la función propuesta, el parámetro que provoca el levantamiento en el último tramo se ve disminuido pasando de 0 a -0,06 para dosificaciones de 4 a 6 [kg/m³], respectivamente.

Se propone la siguiente función para la modelación de la curva promedio de las vigas de HRF BC 54 – 8 [kg/m³):

$$y = 5,5(e^{-9,5x} - e^{-100x}) + 3,75(e^{-(-0,06)x} - e^{-25x}) \quad (17)$$

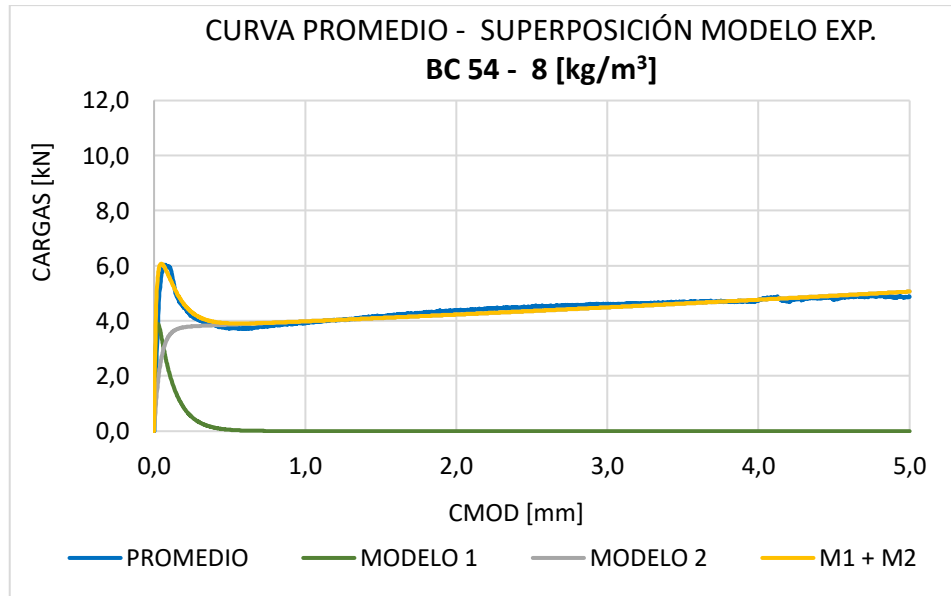


Gráfico N°45: Modelo exponencial BC 54 – 8 [kg/m³]

Estas vigas son las con mayor cantidad de fibra, su curva promedio tiene una carga máxima de 6,04 [kN] y el modelo propuesto alcanza 6,07 [kN], difiriendo en 0,5 %.

Para este caso se puede ver un considerable aumento en el 2° pick del gráfico promedio, alcanzado un 4,93 [kN] cuando CMOD se encuentra entre 2 y 5 [mm].

En cuanto a la función propuesta, el parámetro que provoca la pendiente en el último tramo no se ve afectado manteniéndose con un valor de -0,06

5 Conclusiones.

La campaña experimental se lleva a cabo con éxito, logrando la recaudación de la base de datos correspondiente y generando los gráficos representativos de cada lote de vigas.

En cuanto al ensayo propuesto, se determinan dimensiones específicas para la ubicación en los apoyos de la viga y su entalle. Estos espacios se determinan, de manera tal que, se pueda producir la mayor resistencia en la viga.

Respecto al control de la apertura de grieta, éste se definió de manera arbitraria manteniendo los aumentos de velocidad igual para cada ensayo realizado.

Luego del estudio de la investigación de Lee y Barr, se realiza la iteración para determinar los valores de los parámetros de cada función. Se ajustan los datos experimentales del modelo logrando representar la respuesta carga – apertura de fisura del hormigón sometido a corte de todas las vigas.

A continuación, se presentan tablas resumen de los parámetros considerados para las funciones exponenciales de cada tipo y dosificación de fibra utilizada.

Tabla N°12: Parámetros ecuaciones de vigas HO

HO	kg/m ³	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	0	10,50	8,50	40,00	1,15	0,34	25,00

Los valores que se presentan son los utilizados para las ecuaciones de las vigas de HO sin fibras, por lo que previamente no se tienen datos comparables para generar conclusiones. Se consideran como la base para determinar los parámetros de las vigas con fibras, ya que es la dosificación 0 [kg/m³] (Gráfico N°33).

Tabla N°13: Parámetros ecuaciones de vigas con fibras

FIBRA	kg/m ³	C1	C2	C3	C4	C5	C6
BC 48	2	8,80	4,00	50,00	1,35	-0,07	5,00
	4	9,00	5,50	50,00	1,40	-0,05	5,00
	6	9,20	6,00	50,00	2,25	-0,03	5,00
	8	9,40	6,50	50,00	4,00	0,04	5,00

BC 50	2	9,00	4,30	75,00	0,90	-0,02	15,00
	4	9,50	6,20	75,00	1,90	-0,02	15,00
	5	10,20	6,20	75,00	2,35	-0,02	15,00
	8	8,50	5,50	75,00	3,50	-0,02	15,00
BC 54	2	9,00	3,80	100,00	1,60	-0,06	25,00
	4	7,80	4,00	100,00	3,00	0,00	25,00
	5	6,40	4,20	100,00	2,40	-0,06	25,00
	8	5,50	9,50	100,00	3,75	-0,06	25,00

Para fibras BC 48 se observa que a medida que aumentan las dosificaciones de fibra en las vigas, los parámetros C1, C2, C4 y C5 aumentan y los parámetros C3 y C6 se mantienen constantes. (Gráficos N° 34, 35, 36, 37).

- C1: Genera un aumento constante cada 0,2 unidades, lo cual gráficamente se observa en el pick de la curva, ésta muestra una mayor amplitud a medida que aumentan las dosificaciones
- C2: Se produce un aumento constante de 0,5 unidades a medida que aumentan las dosificaciones, lo cual se ve reflejado en la apertura de la curva, a mayor dosificación la curva se vuelve más cerrada o más cercana al eje Y, luego del pick.
- C3: Se mantiene constante a medida que aumenta el volumen de fibras.
- C4: Los valores no muestran una tendencia clara del aumento generado. Gráficamente se observa, en la postfisuración de las vigas, un mayor soporte antes las cargas (reflejado en eje Y).
- C5: Se observa un aumento en los valores a medida que aumenta la dosificación, sin embargo, la dosificación 8 [kg/m³] no continua esta tendencia, por lo que, para poder determinar su comportamiento, es necesario un estudio con mayores dosificaciones.
- C6: Se mantiene constante a medida que aumenta el volumen de fibras.

Para las fibras BC 50, se observa un comportamiento similar a las fibras BC 48, a medida que aumentan las dosificaciones de fibra en las vigas, los parámetros C1, C2 y C4 aumentan y los parámetros C3, C5 y C6 se mantienen constantes (Gráficos N° 38, 39, 40, 41).

- C1: Genera un aumento constante cada 0,5 unidades aproximadamente, lo cual gráficamente se observa en el pick de la curva, ésta muestra una mayor amplitud al aumentar las dosificaciones, sin embargo, la dosificación 8 [kg/m³] no continua esta tendencia, por lo que, para poder determinar su comportamiento, es necesario un estudio con mayores dosificaciones.

- C2: No muestra una tendencia clara, por lo que es necesario un estudio más profundo para determinar mejor el comportamiento de este parámetro.
- C3: Se mantienen constantes a medida que aumenta el volumen de fibras.
- C4: Los valores van aumentando cada 1 unidad aproximadamente, lo que gráficamente se observa en la postfisuración de las vigas, las cuales soportan mayor carga (reflejado en eje Y).
- C5: Se mantienen constantes a medida que aumenta el volumen de fibras en pendiente positiva, considerando el signo (-) que acompaña a la función.
- C6: Se mantienen constantes a medida que aumenta el volumen de fibras.

Los parámetros de la fibra BC 54 se presentan diferentes a las fibras anteriores, a medida que aumentan las dosificaciones de fibra en las vigas, los parámetros C2 y C4 aumentan, los parámetros C3 y C6 se mantienen constantes, C1 disminuye y C5 no muestra una tendencia clara (Gráficos N° 42, 43, 44, 45).

- C1: A diferencia de las otras fibras, para la BC 54 se produce una disminución en los valores a medida que aumentan las dosificaciones. Para una mejor interpretación, es recomendable un estudio más a fondo de esta fibra u otras similares.
- C2: Se produce un aumento en los valores, sin embargo, no muestra una tendencia clara a medida que aumentan las dosificaciones.
- C3: Se mantienen constantes a medida que aumenta el volumen de fibras.
- C4: En bajas dosificaciones (2 y 4 [kg/m³]) se genera un aumento en el valor de los parámetros, al aumentar a 6 [kg/m³] se produce una disminución y luego en 8 [kg/m³] nuevamente aumenta. No es posible generar conclusiones respecto al comportamiento de este parámetro.
- C5: Se presenta relativamente constante, exceptuando la dosificación de 2 [kg/m³] en la cual se genera un aumento en el valor del parámetro pasando de -0,06 a 0.
- C6: Se mantienen constantes a medida que aumenta el volumen de fibras.

En general se puede concluir que los parámetros C3 y C6 permanecen constantes para cada tipo de fibra.

- Para el caso de C3 al comparar los valores para HRF aumenta cada 25 unidades. Este parámetro genera una mayor sensibilidad en el primer tramo de la curva, determinando la resistencia solo del hormigón.

- En cuanto al parámetro C6, al comparar los valores para HRF aumenta cada 10 unidades. Este parámetro genera una mayor sensibilidad en la apertura del descenso de la curva,

En cuanto a C1, C2 Y C4, éstos generalmente aumentan sus valores a medida que aumentan las dosificaciones, sin embargo, en el caso específico de BC 54, en C1, se produce una disminución de los valores de este parámetro, generando menores pick en cuanto a la resistencia máxima del primer tramo de la curva, para determinar mejor el comportamiento de este parámetro, es recomendable un estudio con otro tipo de fibras u otras dosificaciones.

Considerando que el último tramo de la curva corresponde al comportamiento de la inclusión de fibras, los parámetros que sensibilizan esta zona son C4 Y C5. En cuanto a este último es el que genera mayor incertidumbre en cuanto a su comportamiento, ya que no muestra una tendencia clara entre las fibras y las dosificaciones. Por ello, es recomendable realizar un estudio más a fondo considerando más tipos de fibras y volúmenes.

Respecto a los beneficios que produce la adición de la fibra, se destaca la capacidad del hormigón reforzado de absorber energía posterior a la falla del material, lo que genera una deformación controlada antes del colapso del elemento, en comparación con los hormigones no reforzados.

Finalmente, cabe mencionar que es de suma importancia la correcta ejecución en el proceso de mezclado de vigas y posterior curado de ellas, ya que de ello depende un comportamiento adecuado ante las cargas solicitadas. Adicionalmente tener en consideración que durante cada proceso es probable la existencia de errores humanos e instrumentales.

6 Anexos.

Tabla N°14: Ángulo grietas en vigas con Fibra BC 48

BC 48						
Ítem	Probeta	X	Y	(X/Y)	Ángulo (°)	Promedio
1	BC-150-01.1A	3	7	0,43	23,20	24
2	BC-150-01.1B	2	4,3	0,47	24,94	
3	BC-150-02A	4	7	0,57	29,74	33
4	BC-150-02B	5	7	0,71	35,54	
5	BC-150-04A	4	8	0,50	26,57	29
6	BC-150-04B	3	5	0,60	30,96	
7	BC-300-02A	4	3,9	1,03	45,73	44
8	BC-300-02B	4	4,4	0,91	42,27	
9	BC-300-04A	4	9	0,44	23,96	28
10	BC-300-04B	5	8	0,63	32,01	
11	BC-300-05A	2	3	0,67	33,69	26
12	BC-300-05B	2	6	0,33	18,43	
13	BC-450-02.2A	3	5	0,60	30,96	32
14	BC-450-02.2B	4	6	0,67	33,69	
15	BC-450-03.3A	4	9	0,44	23,96	25
16	BC-450-03.3B	4	8	0,50	26,57	
17	BC-450-06.6A	4	6,5	0,62	31,61	33
18	BC-450-06.6B	4	6	0,67	33,69	
19	BC-600-01.1A	4	6	0,67	33,69	35
20	BC-600-01.1B	4	5,4	0,74	36,53	
21	BC-600-05.5A	3,5	5	0,70	34,99	31
22	BC-600-05.5B	4,5	8,5	0,53	27,90	
23	BC-600-06.6A	6	6	1,00	45,00	40
24	BC-600-06.6B	5	7	0,71	35,54	

Tabla N°15: Ángulos grietas en vigas con Fibra BC 50

BC 50						
Ítem	Probeta	X	Y	(X/Y)	Ángulo (°)	Promedio
1	BC-150-1.A	4,2	8,5	0,49	26,29	27
2	BC-150-1.B	4,7	9,3	0,51	26,81	
3	BC-150-2.A	3	9,3	0,32	17,88	19
4	BC-150-2.B	3,5	9,5	0,37	20,22	
5	BC-150-5.A	4	7	0,57	29,74	30
6	BC-150-5.B	6	10	0,60	30,96	
7	BC-300-4.A	6,5	9	0,72	35,84	35
8	BC-300-4.B	6,3	9,5	0,66	33,55	
9	BC-300-6.A	4,2	10	0,42	22,78	24
10	BC-300-6.B	4,5	10	0,45	24,23	
11	BC-300-7.A	5,7	9	0,63	32,35	33
12	BC-300-7.B	5,8	9	0,64	32,80	
13	BC-450-1.A	6,3	8,3	0,76	37,20	35
14	BC-450-1.B	6	9	0,67	33,69	
15	BC-450-2.2.A	5	8,5	0,59	30,47	26
16	BC-450-2.2.B	3,5	8,5	0,41	22,38	
17	BC-450-5.5.A	6	9	0,67	33,69	38
18	BC-450-5.5.B	7,5	8	0,94	43,15	
19	BC-600-1.1.A	4,5	9,8	0,46	24,66	26
20	BC-600-1.1.B	4	8	0,50	26,57	
21	BC-600-2.2.A	6,5	7,8	0,83	39,81	35
22	BC-600-2.2.B	5,5	9,2	0,60	30,87	
23	BC-600-6.6.A	7	9	0,78	37,87	40
24	BC-600-6.6.B	8,2	9	0,91	42,34	

Tabla N°16: Ángulos grietas en vigas con Fibra BC 54

BC 54						
Ítem	Probeta	X	Y	(X/Y)	Ángulo (°)	Promedio
1	150_02.3A	6	9	0,67	33,69	32
2	150_02.3B	6	10	0,60	30,96	
3	150_02.4A	4	7	0,57	29,74	27
4	150_02.4B	4	9	0,44	23,96	
5	150_02.6A	5	6	0,83	39,81	37
6	150_02.6B	4	6	0,67	33,69	
7	300_01.1A	6	8	0,75	36,87	43
8	300_01.1B	9	8	1,13	48,37	
9	300_01.3A	6	4,5	1,33	53,13	49
10	300_01.3B	8	8	1,00	45,00	
11	300_01.4A	4	6	0,67	33,69	31
12	300_01.4B	5	9	0,56	29,05	
13	450_01.1A	5	9	0,56	29,05	31
14	450_01.1B	4	6	0,67	33,69	
15	450_02.1A	3	4	0,75	36,87	30
16	450_02.1B	4	9	0,44	23,96	
17	450_02.6A	6	9	0,67	33,69	35
18	450_02.6B	6	8	0,75	36,87	
19	600_01.2A	7	9	0,78	37,87	40
20	600_01.2B	8	9	0,89	41,63	
21	600_01.4A	5	6	0,83	39,81	42
22	600_01.4B	9	9	1,00	45,00	
23	600_01.5A	6	8	0,75	36,87	33
24	600_01.5B	5	9	0,56	29,05	

7 Bibliografía.

Referencias.

- B Barr, M.K (2003) Modelling the strain-softening behaviour of plain concrete using a double exponential model. Magazine of Concrete Research, 343-353.
- S Carmona y M Cabrera (2009), Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero, Revista Ingeniería de Construcción, 74-94.

Normas.

- Nch1037 Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. 2009
- Nch148 of 68 "Cemento, Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales".
- Nch1017 Hormigón. Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción pro flexión y por hendimiento. 2009.
- ASTM C1116. (1997) Estándar Specification for Fiber-Reinforced Concrete.100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, Philadelphia, USA: Columbia University.

Memorias.

- Loyola González, Álvaro Cristián. Determinación de parámetros experimentales para la modelación de las curvas de capacidad de absorción de energía de hormigones reforzados con macrofibras sintéticas. Memoria del Departamento de obras civiles, UTFSM Valparaíso, Chile.
- Castro Contreras, Pedro Pablo. Caracterización de hormigones reforzados con altas cuantías de fibras sintéticas. Memoria del Departamento de obras civiles, UTFSM Valparaíso, Chile.
- Celedón Vega, Mauricio Alejandro. Caracterización del comportamiento de hormigones reforzado con fibra sometidos a tracción diagonal. Memoria del Departamento de obras civiles, UTFSM Valparaíso, Chile.
- Torrealba Buller, Matías Simón. Recomendaciones para el uso de fibras como reemplazo parcial de armadura en casas de hormigón. Memoria de la Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas departamento de ingeniería civil. Universidad de Chile.

Sitios web.

- <https://barchip.com/es/product/>
- <http://normastecnicas.minvu.cl/>

- <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Hormigon%20con%20Fibra%20RJ.pdf>
- <https://www.concretonline.com/hormigon/empleo-y-aplicaciones-de-hormigones-reforzados-con-fibras-sinteticas-estructurales>
- <https://www.construccionminera.cl/fibras-para-hormigon-productividad-desde-la-mezcla/#.X4Bw-dBKjIU>
- <https://cri.sika.com/dms/getdocument.get/7bef35eb-d2bb-3ea4-b51f-b5bc3c99b1e2/Concreto%20reforzado%20con%20fibras.pdf>