



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS INCIDENTES EN LA RESPUESTA POST
AGRIETAMIENTO DEL HORMIGÓN PROYECTADO REFORZADO CON FIBRAS DE
POLIPROPILENO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

YASNA KATHERINE HIDALGO YÁÑEZ

PROFESOR GUÍA:

JACQUES BORNAND ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

SERGIO CARMONA MALATESTA

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: YASNA KATHERINE HIDALGO YÁÑEZ
FECHA: 19/10/2017
PROFESOR GUÍA: JACQUES BORNAND ARAYA

“EVALUACIÓN DE PARÁMETROS INCIDENTES EN LA RESPUESTA POST
AGRIETAMIENTO DEL HORMIGÓN PROYECTADO REFORZADO CON FIBRAS DE
POLIPROPILENO”

El comportamiento del hormigón proyectado reforzado con fibras de polipropileno ha sido estudiado desde hace algunos años en diversos trabajos, tanto teóricos como experimentales. Aún no se tiene una respuesta clara en cuanto a su desempeño luego del agrietamiento del hormigón, por lo que se vuelve imprescindible un estudio que evalúe la compatibilidad entre los materiales que componen la mezcla de hormigón y fibras, y así definir las condiciones que permiten optimizar su desempeño.

El objetivo de la memoria es analizar los efectos de fibras de polipropileno en el hormigón estructural y, de esta forma, investigar de qué manera contribuyen en su comportamiento y desempeño post agrietamiento de la matriz cementicia, considerando como variable la dosis de las fibras y la resistencia del hormigón.

La metodología de esta investigación consiste en la confección de hormigones de prueba con distintas resistencias y dosis de fibras, y la posterior evaluación de la resistencia residual de estas probetas para estas configuraciones, utilizando la norma europea *EN-14651: Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión* en los ensayos. Posteriormente, con ayuda de los análisis respectivos de los resultados, establecer requerimientos para las dosis de fibras respecto al grado de resistencia de hormigón, para así lograr un adecuado comportamiento de los materiales trabajando en conjunto, especialmente en su estado endurecido posterior al momento de la fisuración.

Al término de la etapa experimental, se obtienen mezclas cementicias con propiedades de hormigón proyectado, contando con una variada dosificación de fibra, siendo el máximo $8 [kg/m^3]$. En cuanto a sus propiedades mecánicas, se tiene que la incorporación de fibras sintéticas aumenta considerablemente la resistencia en el rango post-fisuración, y con ello la tolerancia de soportar deformaciones. A modo de síntesis, se establece que los requerimientos mínimos de los parámetros estudiados para cumplir los criterios funcionalidad estructural en el shotcrete expuestos en este estudio son que, por un lado, se tenga una resistencia de al menos $30 [MPa]$ en el hormigón y que la mezcla en cuestión tenga como mínimo la cantidad de $6 [kg/m^3]$ de fibra de polipropileno, analizando el correcto desempeño para cada caso, y así corroborar si cumple con algún criterio que evalúe la funcionalidad estructural.

A mi familia.

Agradecimientos

Quisiera dar las gracias a toda la gente que me ayudó con un poco de su tiempo y trabajo para sacar adelante esta investigación que para mí ha significado mucho esfuerzo y dedicación, considerando los múltiples inconvenientes que surgieron a lo largo del desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, agradezco al profesor Jacques por su colaboración con temas burocráticos y prácticos, y su motivación a que terminara el trabajo bajo su dirección. En el mismo escenario, agradezco a Don Luis quien, como encargado del Laboratorio de Hormigones de Prueba de IDIEM, aportó junto a Matías con granitos de arena que aliviaron un poco la programación de los hormigones. También quiero incluir a los laboratoristas que hicieron el aguante en los procesos prácticos, tanto los que se han ido como los que se encuentran hoy: Iván, Felipe, Erick, José, Gonzalo, JP, Jorge.

En esta sección también pretendo agradecer a Héctor, quien me ayudó con los ensayos de las vigas que estuve enviando a Calama y por mantenerme al tanto de la llegada de las probetas. También a Mitzi que me ayudó a trabajar con los datos. Además, quiero incluir a Don Humberto, pues me apoyó con los cortes de la entalla de las vigas desinteresadamente, y a los chiquillos de GEP, en especial a Hernán.

Por otro lado, quisiera reconocer el apoyo otorgado por Samuel, jefe de laboratorio de MELON, que contribuyó con el préstamo de moldes de viga en un momento en el que necesitaba acelerar la programación.

Y, por supuesto, quiero agradecer a mi compañera Daniela que me apoyó a lo largo del proceso con consejos, confecciones de hormigón, ensayos de cilindros, viajes para ir por árido, embalaje de vigas y más que todo, con su preocupación.

Por último, quisiera dar las gracias al profesor Sergio Carmona de la Universidad Técnica Federico Santa María, que colaboró con la tramitación de los ensayos de las últimas series de vigas que me quedaban por ensayar cuando se clausuró el laboratorio de Calama. Asimismo, debo incluir en esta parte a Enrique, memorista del profesor, y, por otro lado, a los chiquillos de LEMCO, principalmente a Fredy y a Aron.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción	13
1.1. Antecedentes	13
1.2. Objetivos	14
1.2.1. General.....	14
1.2.2. Específicos	14
1.3. Metodología	14
1.4. Alcance	15
Capítulo 2. Marco Teórico	16
2.1. Hormigón Proyectado.....	16
2.1.1. Hormigón Proyectado por vía húmeda	16
2.1.2. Hormigón Proyectado por vía seca.....	17
2.1.3. Ventajas del Hormigón Proyectado	17
2.2. Hormigón Reforzado con Fibras	18
2.2.1. Caracterización de fibras	19
2.2.2. Comportamiento de las fibras.....	21
2.3. Influencia de las fibras en las propiedades del hormigón.....	23
2.3.1. Avances en el ámbito estructural.....	24
2.4. Aplicaciones	27
2.4.1. Hormigón Proyectado	27
2.4.2. Hormigón Reforzado con Fibra (HRF)	27
2.5. Normativa, Ensayos y Mediciones	28
2.5.1. Ensayos y Mediciones en Estado Fresco	28
2.5.2. Ensayos en Estado Endurecido.....	28
2.5.3. Normativa para evaluar funcionalidad estructural de la fibra en el hormigón	
32	
Capítulo 3. Materiales	34
3.1. Cemento	34
3.2. Áridos.....	34
3.3. Fibras	36
3.4. Aditivos	37
3.4.1. Plastificante	37
3.4.2. Superplastificante	37
Capítulo 4. Programa experimental y Resultados	39

4.1. Definición de variabilidad de los hormigones	39
4.2. Propiedades de los hormigones en estado fresco	40
4.3. Propiedades de los hormigones en estado endurecido	41
4.3.1. Ensayos de resistencia a compresión.....	41
4.3.2. Resultados de ensayos de resistencia a la flexotracción.....	43
Capítulo 5. Análisis de Resultados.....	69
5.1. Análisis de resultados obtenidos en laboratorio	69
5.1.1. Variabilidad de resistencia residual según cantidad de fibra por hormigón ...	69
5.1.2. Variabilidad de resistencia residual según tipo de hormigón	75
5.2. Funcionalidad estructural de la fibra en el hormigón.....	81
5.2.1. EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural	81
5.2.2. EN 14889-2 Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad	84
5.2.3. Model Code 2010	87
5.2.4. Análisis comparativo de los criterios considerados.....	90
Capítulo 6. Conclusiones	92
Bibliografía	94

Índice de figuras

Figura 1: Hormigón Proyectado por vía húmeda (Guía Chilena del Hormigón Proyectado, 2015).....	17
Figura 2: Hormigón Proyectado por vía seca (Guía Chilena del Hormigón Proyectado, 2015).....	17
Figura 3: Algunos tipos de fibras usados en el mercado (MACCAFERRI, 2007).	20
Figura 4: Curvas carga-desplazamiento típicas para hormigón en masa (HN) y hormigones reforzados con fibras (HRF) (Carmona & Cabrera, 2009).	21
Figura 5: Elemento de hormigón reforzado con fibras sometido a tracción o flexotracción (Blanco, 2008).	22
Figura 6: Esquemmatización de las curvas carga-deformación en los fenómenos de endurecimiento y reblanqueamiento del hormigón fibro-reforzado (Carmona, 2014).	23
Figura 7: (a) Orientación de las fibras debido a los bordes del molde (b) Efecto del vibrado. (Molins & Mora, 2007)	26
Figura 8: Configuración de la instalación de la probeta para el ensayo EN 14651, donde '1' muestra el dispositivo de fijación deslizante; '2', el dispositivo de fijación rotativa; y '3', el bastidor rígido. (20)	31
Figura 9: Curva de carga en función del CMOD con F_j ($j = 1,2,3,4$) del ensayo EN 14651.	32
Figura 10: Granulometría con ajuste EFNARC de las arenas a utilizar.....	36
Figura 11: Resistencia a la compresión del hormigón variando la cantidad de fibra de polipropileno.	42
Figura 12: Ensayo de Resistencia residual con las prensas de resistencia residual, marca ToniTechnik (a la izquierda) y Controls (a la derecha).	43
Figura 13: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 0 $[kg/m^3]$ de fibras de polipropileno.	44
Figura 14: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 2 $[kg/m^3]$ de fibras de polipropileno.	45
Figura 15: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 4 $[kg/m^3]$ de fibras de polipropileno.	46
Figura 16: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 6 $[kg/m^3]$ de fibras de polipropileno.	47
Figura 17: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 8 $[kg/m^3]$ de fibras de polipropileno.	48
Figura 18: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 0 $[kg/m^3]$ de fibras de polipropileno.	49

Figura 19: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	50
Figura 20: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	51
Figura 21: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	52
Figura 22: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	53
Figura 23: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	54
Figura 24: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	55
Figura 25: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	56
Figura 26: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	57
Figura 27: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	58
Figura 28: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	59
Figura 29: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	60
Figura 30: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	61
Figura 31: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	62
Figura 32: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	63
Figura 33: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	64
Figura 34: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	65
Figura 35: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	66
Figura 36: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	67
Figura 37: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.....	68
Figura 38: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G20....	70

Figura 39: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G30....	71
Figura 40: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G40....	72
Figura 41: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G50....	73
Figura 42: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G60....	74
Figura 43: Curvas carga-deformación para los hormigones sin dosis de fibra de polipropileno.....	76
Figura 44: Curvas carga-deformación para los hormigones con 2 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.....	77
Figura 45: Curvas carga-deformación para los hormigones con 4 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.....	78
Figura 46: Curvas carga-deformación para los hormigones con 6 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.....	79
Figura 47: Curvas carga-deformación para los hormigones con 8 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.....	80
Figura 48: Variación de las restricciones en función de la cantidad de fibra de polipropileno para cada grado de hormigón, según criterio de EHE-08.	83
Figura 49: Cumplimiento de criterio de funcionalidad estructural según el documento EHE-08.....	84
Figura 50: Variación de las restricciones en función de la cantidad de fibra de polipropileno para cada grado de hormigón, según criterio de EN 14889-2.....	86
Figura 51: Cumplimiento de criterio de funcionalidad estructural según el documento EN 14889.	86
Figura 52: Variación de las restricciones en función de la cantidad de fibra de polipropileno para cada grado de hormigón, según criterio de MC 2010.	89
Figura 53: Cumplimiento de criterio de funcionalidad estructural según el documento MC 2010.	90
Figura 54: Intersección de los criterios estudiados en la investigación en cuanto al cumplimiento de los criterios de funcionalidad estructural.	91

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades de algunos ensayos para caracterizar el Hormigón Reforzado con Fibra. Se tiene que l_f es el largo de la fibra, mientras que b , d y l son el ancho, el alto y el largo de la viga (Carmona, 2014).	29
Tabla 2: Información Técnica Melón Extra.	34
Tabla 3: Características principales de las arenas utilizadas.	35
Tabla 4: Características de la fibra sintética BarChip48.	37
Tabla 5: Relación a/c asumida para cada resistencia de hormigón propuesta.	39
Tabla 6: Propiedades de los hormigones en estado fresco.	40
Tabla 7: Resultados de la resistencia a compresión de las muestras a los 28 días de curado.	41
Tabla 8: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	44
Tabla 9: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	45
Tabla 10: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	46
Tabla 11: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	47
Tabla 12: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	48
Tabla 13: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	49
Tabla 14: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	50
Tabla 15: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	51
Tabla 16: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	52
Tabla 17: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	53
Tabla 18: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	54
Tabla 19: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	55
Tabla 20: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	56

Tabla 21: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	57
Tabla 22: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	58
Tabla 23: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	59
Tabla 24: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	60
Tabla 25: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	61
Tabla 26: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	62
Tabla 27: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	63
Tabla 28: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 0 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	64
Tabla 29: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 2 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	65
Tabla 30: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 4 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	66
Tabla 31: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 6 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	67
Tabla 32: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 8 [kg/m ³] de fibras de polipropileno.	68
Tabla 33: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G20.	69
Tabla 34: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G30.	71
Tabla 35: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G40.	72
Tabla 36: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G50.	73
Tabla 37: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G60.	74
Tabla 38: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones sin dosis de fibra de polipropileno.	76
Tabla 39: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 2 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.	77

Tabla 40: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 4 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.....	78
Tabla 41: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 6 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.....	79
Tabla 42: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 8 [kg/m ³] de fibra de polipropileno.....	80
Tabla 43: Resultados para evaluar función estructural según el documento EHE-08....	82
Tabla 44: Resultados para evaluar función estructural según el documento EN 14889-2.	85
Tabla 45: Resultados para evaluar función estructural según el documento MC (2010).	88

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

Actualmente en Chile es común el uso de hormigón proyectado en diversos tipos de proyectos. En particular, el uso de hormigón proyectado en fortificación, sostenimiento y revestimiento de túneles se ha masificado, por la facilidad y rapidez que representa en su ejecución. Los avances en esta área han ido en la línea de mejorar algunas propiedades del hormigón, así es como la incorporación de fibras al material fue incluida para entregarle una resistencia post agrietamiento al hormigón y, de esta forma, disminuir, y en algunos casos reemplazar, la cantidad de armadura en la fortificación de túneles.

Si bien, la incorporación de fibras al hormigón es algo cada vez más recurrente en los proyectos mineros, el estudio de dosificaciones de hormigón con fibra es algo donde todavía queda mucho que investigar. Lo anterior ha provocado que las especificaciones se basen solamente en experiencias de proyectos anteriores y/o extranjeros, y muchas veces se determinen mezclas de hormigón que, en lo práctico, no son compatibles con las dosis de fibra que se indican en las dosificaciones.

El diseño de hormigones con fibra supone, como premisa, que al momento de la fisuración y posterior agrietamiento, la fibra será capaz de resistir las tensiones que se producen en esos instantes, principalmente en el momento del agrietamiento. En la práctica, se observan diversas dosificaciones de hormigón con fibra que no permiten un buen desempeño post agrietamiento, ya que no consideran la relación que debe existir entre el diseño de resistencia del hormigón y las dosis de fibra incorporadas. En efecto, al evaluar hormigones con fibra se observan, en algunos casos, incongruencias en el desempeño por causa de:

- Dosis de fibra insuficiente para soportar las tensiones al momento de la fisuración.
- Hormigones de muy alta resistencia que transmiten a las fibras tensiones demasiado altas al momento de la fisuración.

Ambas causas mencionadas provocan, al momento del agrietamiento, que las fibras no soporten adecuadamente las tensiones y induzcan deformaciones mayores a las esperadas y, en algunos casos, la simple rotura de gran parte de las fibras, lo que deriva en que el hormigón no genere la resistencia residual que se espera, experimentando una falla frágil al momento de la fisuración.

Por lo expuesto anteriormente, se vuelve necesario estudiar la relación que debe existir entre la resistencia de los hormigones y las dosis de fibra que se incorporan, para que el material compuesto experimente, en la práctica, un comportamiento adecuado al momento del agrietamiento inicial y una resistencia residual conforme a los supuestos que se consideran en el diseño estructural.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Evaluar la relación entre la resistencia del hormigón y las dosis de fibra de polipropileno en el diseño de hormigones proyectados que incorporen este material.

1.2.2. Específicos

La investigación propuesta pretende desarrollar los siguientes ejes:

- Evaluar el comportamiento resistente, en el rango pre y post agrietamiento, de hormigones tipo shotcrete con fibra de polipropileno, con distinto grado de resistencia y dosis de fibra.
- Establecer una banda de parámetros entre la resistencia y la dosis de fibra de polipropileno que permiten un adecuado comportamiento del hormigón luego del agrietamiento (resistencia residual).
- Evaluar comparativamente la capacidad del hormigón proyectado con fibra de polipropileno respecto al convencional.
- Determinar ventajas y desventajas en el uso del hormigón dosificado con fibra de polipropileno.

1.3. Metodología

- Revisión del estado del arte relativa al hormigón proyectado reforzado con fibras de polipropileno.

Este punto es importante, ya que a través de la investigación de otros estudios relacionados al tema se espera construir el enfoque que tendrá experimentalmente el trabajo. Con la búsqueda de literatura relacionada se espera obtener un marco teórico base, con el objeto de obtener un avance real en los objetivos y alcances a considerar.

- Variables a analizar

En general, se quiere estudiar un rango de variabilidad de los parámetros con el fin de caracterizar la compatibilidad de los materiales en sus puntos críticos. Tales variables a considerar en el programa experimental son la cantidad de fibra de polipropileno y la resistencia del hormigón. Los parámetros fueron fijados según lo que normalmente se utiliza en la confección de hormigones proyectados, sumando a ello un abanico de posibilidades que ayudan a la posterior caracterización del hormigón proyectado, logrando incorporar la zona factible operativamente de la combinación de tales variables, las cuales quedan estipuladas de la siguiente manera:

- Cantidad de fibra de polipropileno [kg/m^3]: 0, 2, 4, 6, 8.

- Resistencia a compresión del hormigón, f'_c [MPa]: 20, 30, 40, 50, 60.
- Programa experimental

Una vez definida la etapa anterior, se hace necesaria una planificación del proceso experimental que apunte a la evaluación de la resistencia a través de mezclas de prueba, y de esta manera llegar a determinar las condiciones óptimas que maximizan el rendimiento del material. Esta fase es considerada como la más crítica por la coordinación que conlleva con el laboratorio a utilizar y con la disponibilidad de material para la confección.

- Realización de ensayos en vigas con diferentes dosis de fibras de polipropileno.

En esta fase experimental se espera dilucidar el comportamiento del hormigón proyectado con fibras de polipropileno, con el objeto de lograr captar la conducta de la resistencia residual en las distintas probetas ensayadas.

- Análisis y conclusiones

Sobre la base de los resultados de ensayo se espera identificar los rangos de compatibilidad de los materiales estudiados.

1.4. Alcance

A partir del estudio experimental, se espera identificar los requerimientos para la dosis de fibra con respecto al grado de resistencia del hormigón, para lograr un apropiado comportamiento del material compuesto al momento de la fisuración y posterior agrietamiento, de acuerdo a los parámetros supuestos en el diseño estructural del hormigón proyectado con fibra. Se propone acotar las resistencias involucradas en el estudio a un rango comprendido entre 20 [MPa] y 60 [MPa], y por su parte las dosis de fibra hasta 8 [kg/m^3]. Las dosificaciones de los hormigones a confeccionar corresponden a una mezcla base común utilizada en hormigón proyectado.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Hormigón Proyectado

En Chile, el concepto de “hormigón proyectado” ha sido adoptado para la descripción del “Shotcrete”, que de acuerdo con la definición que mejor lo precisa convencionalmente, se trata de un “hormigón colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla” (ACI, 2013).

El hormigón proyectado está constituido por cemento, árido fino (arena) y árido grueso (generalmente de diámetro hasta 10 [mm]), agua, aditivos y eventualmente adiciones finas complementarias tales como la microsílíce. La relación a/c , que corresponde a la masa de agua libre dividida por la masa total de cemento en la mezcla de hormigón proyectado, es un parámetro importante, especialmente en las especificaciones tradicionales de durabilidad del hormigón, aun cuando su uso en nuestro país se está abandonando en favor de mediciones directas de la permeabilidad del hormigón. (ICH, 2015)

El hormigón proyectado puede clasificarse de acuerdo al proceso de proyección en hormigón proyectado por vía seca y hormigón proyectado por vía húmeda. El Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile considera la descripción de cada proceso y sus respectivas acotaciones en la *Guía Chilena del Hormigón Proyectado (2° edición)*, tal y como sigue a continuación.

2.1.1. Hormigón Proyectado por vía húmeda

Técnica en la que el cemento, áridos y el agua se procesan por lotes y se mezclan juntos en una planta de hormigón o equipo móvil de mezclado, para luego transportarlos y finalmente vaciarlos en una bomba. Desde este punto la mezcla se transporta a través de una manguera a una boquilla en donde se proyecta neumáticamente sobre el sustrato. El aire comprimido se introduce en el flujo de material en la boquilla con el fin de proyectar el material hacia el sustrato. A este hormigón proyectado se incorporan aditivos acelerantes antes de ingresar a la boquilla y también se le puede incluir fibras durante el mezclado. La esquematización del procedimiento se expone en la Figura 1.



Figura 1: Hormigón Proyectado por vía húmeda (Guía Chilena del Hormigón Proyectado, 2015).

2.1.2. Hormigón Proyectado por vía seca

Técnica en la que el cemento y agregados se procesan por lotes y se mezclan mecánicamente. El material es transportado neumáticamente a través de mangueras o tuberías a una boquilla donde se introduce agua para humedecer la mezcla antes de que sea proyectada. Este hormigón proyectado también puede incluir aditivos o fibras o una combinación de ambos. Se dispone de la Figura 2 para mostrar el proceso general.



Figura 2: Hormigón Proyectado por vía seca (Guía Chilena del Hormigón Proyectado, 2015).

2.1.3. Ventajas del Hormigón Proyectado

En Chile, la mayor parte del hormigón proyectado se aplica por el método de mezcla húmeda con un equipo robotizado o a través de proyección manual. Sin embargo, en ciertas aplicaciones es más adecuado utilizar el proceso de mezclado en seco.

El hormigón proyectado juega hoy en día un papel esencial en la industria de la construcción civil y minera. Es un material extremadamente versátil, que puede ser fácil y rápidamente aplicado transformándose en un medio rentable para la construcción.

Asimismo, la guía contempla como principales ventajas del hormigón proyectado sobre el hormigón moldeado las siguientes:

- La colocación y compactación se efectúan en una sola etapa.
- Los moldajes generalmente no son necesarios.
- Permite un rápido proceso de colocación y puesta en servicio.
- En obras de sostenimiento o tunelería permite acortar los ciclos de trabajo.

Por último, la *Guía Chilena del Hormigón Proyectado* señala que tras la aplicación y después de un período inicial de fraguado y de rigidización, el hormigón proyectado proporciona un soporte pasivo temprano al terreno. A medida que el shotcrete endurece y gana resistencia, deformaciones subsecuentes generan una significativa mayor resistencia, ya que el hormigón proyectado se vuelve también más rígido.

2.2. Hormigón Reforzado con Fibras

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) constituye una de las innovaciones más destacables en el ámbito de los hormigones especiales. Según el ACI 116R-00, el HRF se define como una combinación de cemento hidráulico, agua, áridos finos y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas aleatoriamente distribuidas.

De acuerdo a lo que propone Pujadas (2013), la incorporación de fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción, impidiendo la abertura y propagación de fisuras. Una vez el hormigón ha fisurado, el aporte a tracción debido al efecto puente de las fibras aumenta la resistencia residual del material compuesto. Consecuentemente, y gracias a los mecanismos de pérdida de adherencia y arrancamiento de las fibras, se disipa una mayor energía, lo que conduce a un importante incremento de la tenacidad y un mayor control de la fisuración. En general, la efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza de las fibras empleadas. En este sentido, el hormigón reforzado con fibras plásticas (HRFP) atrajo la atención de los investigadores en la primera mitad de los años 60.

Bajo la misma línea, Pujadas (2013), establece que tradicionalmente los usos del HRFP han sido los pavimentos y la construcción subterránea. Las fibras, generalmente, se empleaban en dichas aplicaciones con el único propósito de mejorar la durabilidad del elemento, dada la efectividad de las fibras en el control de la fisuración a tempranas edades y también posteriormente en estado endurecido. Sin embargo, la función estructural de las fibras no se contemplaba en términos de proyecto o diseño. En este sentido, la aparición de fibras sintéticas estructurales de alto módulo elástico en el mercado constituye un destacado reto dentro del ámbito del HRF (aunque su rendimiento no sea comparable al de las fibras de acero). Las fibras plásticas ofrecen actualmente grandes prestaciones y, además de ser económicas respecto a otras fibras, son químicamente inertes y muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón, lo que las convierte no solamente en una posible solución estructural, sino que pueden permitir una reducción de costes y recursos asociados a la construcción con destacadas mejoras en cuanto a la durabilidad, aumentando la vida útil de la estructura.

2.2.1. Caracterización de fibras

Actualmente, la norma ASTM C1116 define las fibras como: “Filamentos finos y alargados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido en una mezcla de hormigón fresco”. En el mismo documento, la ASTM (2003), se clasifica las fibras según su materialidad principalmente en tres tipos:

- Tipo I Hormigón o Shotcrete reforzado con fibras de acero.
- Tipo II Hormigón o Shotcrete reforzado con fibras de vidrio.
- Tipo III Hormigón o Shotcrete reforzado con fibras sintéticas.

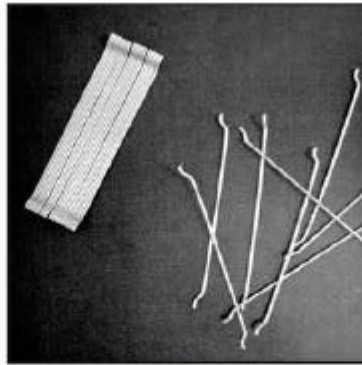
Las fibras sintéticas se fabrican de materiales tales como acrílico, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno. En general, las fibras sintéticas se caracterizan por tener elevada resistencia a la tensión y, entre ellas, se definen dos categorías: las de alto y las de bajo módulo de elasticidad. Las principales ventajas de la adición de fibras sintéticas en el concreto son, en estado endurecido, el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto y, en el estado fresco, el control de la contracción plástica. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil de la estructura y brinda mayor resistencia a la fatiga. (Mendoza, Aire, & Dávila, 2011)

Por otro lado, existe una forma anexa de clasificación de fibras según su funcionalidad. Según lo propuesto por la guía técnica *Hormigón Reforzado con Fibras* (SIKA), las fibras se dividen dos tipos: las microfibras y las macrofibras. Las primeras se caracterizan por ser destinadas a evitar la fisuración del hormigón en estado fresco o antes de las 24 horas. Las más frecuentes son las fibras de polipropileno, cuya dosificación en peso oscila entre 0,3 a 1,2 [kg/m^3] de hormigón. Se trata de dosificaciones extremadamente bajas pero muy eficientes que previenen la fisuración del hormigón por retracción plástica. Estas fibras tienen diámetros entre 0,023 a 0,050 [mm], pueden ser monofilamento o fibriladas. En cuanto a las macrofibras, éstas están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, a reducir el ancho de la fisura si ésta se presenta y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada. Las dosificaciones más frecuentes oscilan entre 0,2 a 0,8% del volumen del hormigón, siendo más específico, para el caso de las dosis de fibra sintéticas varían entre 2 a 9 [kg/m^3]. Las macrofibras más usadas son las sintéticas y las metálicas cuyos diámetros varían entre 0,05 a 2,00 [mm].

Por lo tanto, existe una gran variedad en fibras, pudiendo variar su material, diámetro, largo esbeltez, rugosidad, módulo de elasticidad e incluso la resistencia a la tracción. En la Figura 3, se pueden apreciar algunas fibras que comúnmente se ven en el mercado.



Macrofibras de acero anclada suelta.



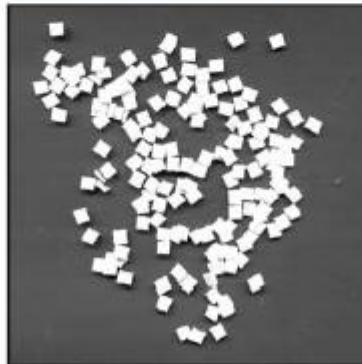
Macrofibras de acero anclada pegadas.



Microfibras de polipropileno.



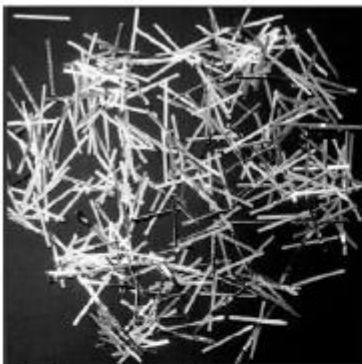
Fibras de vidrio.



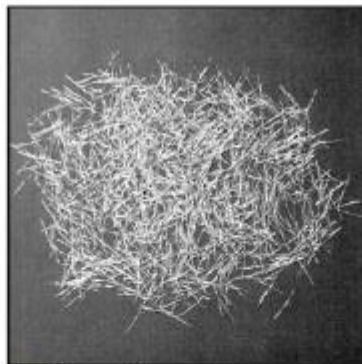
Fibras de celulosa.



Macrofibras metálicas fresadas.



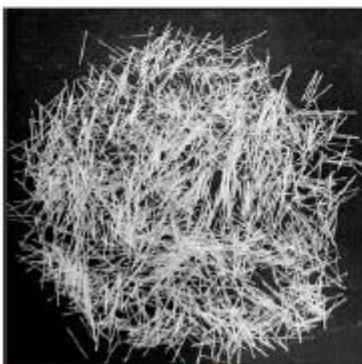
Microfibras metálicas laminadas.



Microfibras metálicas.



Macrofibras de polipropileno alta tenacidad.



Microfibras de polipropileno.



Microfibras sintéticas .



Microfibras metálicas.

Figura 3: Algunos tipos de fibras usados en el mercado (MACCAFERRI, 2007).

2.2.2. Comportamiento de las fibras

El hormigón reforzado con fibras sintéticas podría ser considerado como una variante al refuerzo con secciones de acero. Para este caso, el refuerzo sería conformado por una gran red de pequeñas fibras, distribuidas de forma aleatoria en la mezcla, las cuales tienen la función de soportar las tracciones del hormigón tras la fisuración del mismo.

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 árido o una fibra. 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). A partir de lo anterior, se puede concluir que la adición de fibras como refuerzo de hormigones puede incrementar muchas de sus propiedades en el rango post – agrietamiento (ACI 2008a), como se puede ver en la Figura 4, donde se muestran curvas carga - desplazamiento de vigas de hormigones con y sin refuerzos de fibras. En ellas se puede observar que en el régimen pre – fisuración (pre – máximo) el comportamiento del material está regido por la matriz cementicia y no se observan diferencias significativas entre los diferentes materiales. El efecto beneficioso de las fibras en el incremento de ductilidad del hormigón sometido a flexión ha sido ampliamente estudiado en los últimos años. (Carmona & Cabrera, 2009)

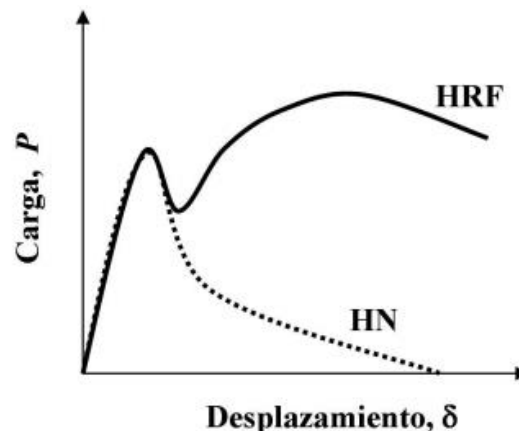


Figura 4: Curvas carga-desplazamiento típicas para hormigón en masa (HN) y hormigones reforzados con fibras (HRF) (Carmona & Cabrera, 2009).

Las fibras al reducir las pequeñas grietas que siempre se producen en la matriz del concreto, aumentan la resistencia a la fisuración y la ductilidad del material, así como en grado pequeño, la resistencia a tensión. Las ventajas principales del HRF son su resistencia al impacto, su resistencia a esfuerzos térmicos, su resistencia al desgaste y astillamiento y su elevada capacidad de absorción de energía. (López, 2015)

Durante el proceso de carga en el hormigón fibro-reforzado, el hormigón comienza a soportar las solicitaciones a las que está sometido, pero luego, cuando comienzan las

fisuraciones en la matriz, las fibras comienzan a trabajar mecánicamente lo que ayuda a que el material siga soportando las cargas, tal y como se muestra en la Figura 5.

En particular, se puede establecer que la forma y longitud de las fibras, tanto de acero como sintéticas, tienen influencia en el desarrollo de resistencia a flexión y otras propiedades mecánicas como la ductilidad, ya que la fibra de acero con extremos con ganchos muestra una mejor adherencia con el concreto, mientras que la fibra de copolímero tipo recta y polímeros tipo ondulada generan un mejor desempeño en el hormigón (Meza de Luna, y otros, 2014). En términos generales, las propiedades mecánicas y físicas de un sistema compuesto como lo es el HRF dependen de las propiedades de sus componentes, tipo de fibra y de la interacción mecánica, física y química entre ellos. (López, 2015)

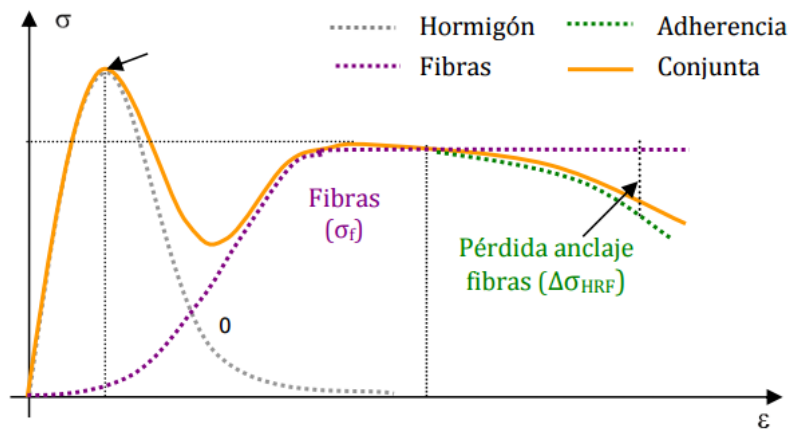


Figura 5: Elemento de hormigón reforzado con fibras sometido a tracción o flexotracción (Blanco, 2008).

En esta misma línea, se caracteriza de manera general la forma de la curva luego de la fisuración del hormigón fibro-reforzado, teniéndose dos comportamientos identificables: el *endurecimiento (hardening)*, en donde, la carga que soporta la probeta es aún mayor luego de la fisura; y el *reblandecimiento (softening)*, cuando la capacidad de carga decae luego de la fisura. Este fenómeno considera variables como la composición de la mezcla del hormigón, el tipo de fibra y su cantidad (C_f), y se puede visualizar en la Figura 6.

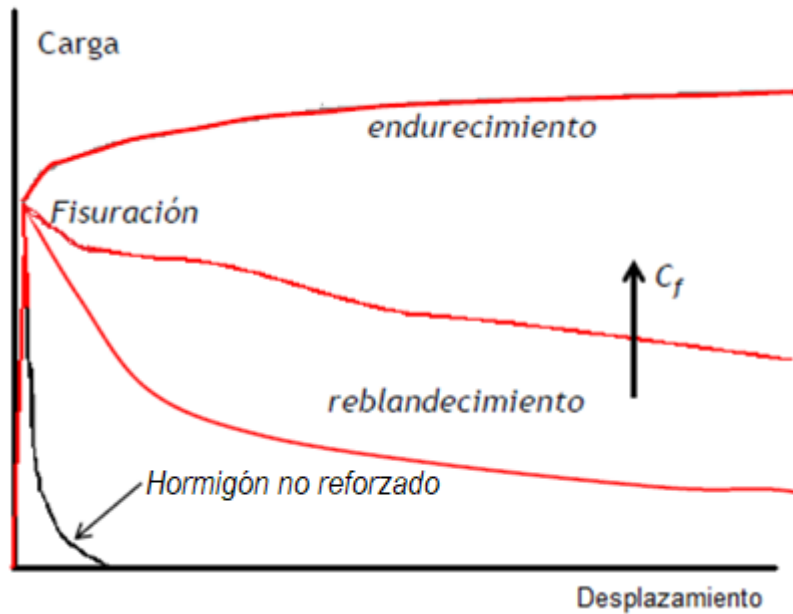


Figura 6: Esquematización de las curvas carga-deformación en los fenómenos de endurecimiento y reblandecimiento del hormigón fibro-reforzado (Carmona, 2014).

Experimentalmente, se tiene que llegar a una homogeneidad de la mezcla, por lo que se debe tener especial cuidado en la confección de la misma, incorporando la fibra paulatinamente para evitar aglomeraciones, y de esta manera evitar la aparición de los comúnmente llamados “erizos”, y de este modo, tener una distribución de fibras que cumpla con la homogeneidad del hormigón, y que esto conlleve al comportamiento deseado.

2.3. Influencia de las fibras en las propiedades del hormigón

Las principales ventajas de la adición de fibras sintéticas en el concreto son, en estado endurecido, el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto y, en el estado fresco, el control de la contracción plástica. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil de la estructura y brinda mayor resistencia a la fatiga. (Mendoza, Aire, & Dávila, 2011)

Durante los últimos años se han realizado diversos estudios para evaluar las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de polipropileno, en los que el porcentaje de fibras ha variado entre 0.1 y 10% del volumen. Algunos de estos resultados son contradictorios respecto a los efectos de las fibras de polipropileno en las resistencias a compresión y flexión del concreto. Algunos estudios indican que la presencia de las fibras tiene efectos negativos en la resistencia a compresión, aunque se alcanzan ligeros incrementos en la resistencia a flexión, cuando el contenido de fibra es relativamente alto. Otros estudios presentan efectos favorables de la adición de fibra sobre la tenacidad e incremento en la resistencia a compresión. (Mendoza, Aire, & Dávila, 2011)

De manera general, existen estudios que pretenden evaluar el impacto del hormigón fibro-reforzado expuesto a fuego, y se ha llegado a que efectivamente se puede aumentar la resistencia a la exfoliación de las paredes (*spalling*), mientras que la instalación de malla de alambre tiene un impacto negativo en la resistencia general al fuego de las paredes (Pothisiri, Chou, & Sektheera, 2016). De hecho, existen una investigación que propone que la incorporación de fibras de polipropileno al hormigón es una buena alternativa, ya que mejora su fuerza y su comportamiento en caso de incendio. Además, la adición de fibras de acero presenta ventajas en comparación con el hormigón tradicional, aunque no es capaz de alcanzar el rendimiento obtenido al añadir fibras de polipropileno. (Serrano, Cobo, Prieto, & González, 2016)

2.3.1. Avances en el ámbito estructural

2.3.1.1. Incorporación de la fibra de polipropileno en elementos estructurales

Existen múltiples estudios en los que se investiga con un enfoque más estructural los beneficios del hormigón reforzado con fibras. Frente a esto, se tienen algunos avances, por ejemplo, en una investigación hecha en tuberías reforzadas con mallas y fibra de polipropileno, se concluye que el número de capas de refuerzo de acero en el hormigón de las tuberías se puede reducir con el uso de fibras sintéticas. Esto permite el aumento de la cubierta protectora de hormigón sobre el acero, todo lo cual es una ventaja importante hacia el aumento de la vida útil del hormigón en ambientes agresivos, incluyendo alcantarillado sanitario, donde la corrosión inducida es una preocupación importante (ACI, 2014). En esta misma línea, existen investigaciones en las que se ha utilizado la fibra de polipropileno en hormigón reforzado con barras de acero, y se ha verificado que este material ayuda a mantener la resistencia del elemento mejorando sus propiedades de adherencia después de la fisura de la matriz. El rol de las fibras en el control de la fisuración y su cualidad de mantener los fragmentos fisurados unidos, incluso después de una fisura totalmente desarrollada, puede ser beneficioso de usar en elementos de hormigón reforzado y hormigón pretensado. (Muntean, Cazacu, Mizgan, Galatanu, & Tamas, 2016)

Bajo la misma perspectiva estructural, se realizó un estudio de la factibilidad del uso de fibras de polipropileno y/o acero en reemplazo de mallas en los sostenimientos de hormigón proyectado para túneles interestación del Metro de Santiago, del cual se concluyó en términos de diseño estructural, que el elemento que más aportó en la sección fue el marco reticulado, y las fibras no presentaron diferencias significativas de capacidad o ductilidad a la estructura respecto de la malla. Además, se señala que el diseño actual en los túneles interestación (en cuanto a espesores) no reconoce que la grava de Santiago tiene una buena capacidad para sostenerse a sí misma, y que las deformaciones en el entorno son muy pequeñas. (Nazar, 2016)

Por otro lado, existe una investigación experimental sobre la posibilidad de utilizar segmentos de túneles prefabricados de hormigón reforzado con fibra en lugar de elementos tradicionales de hormigón armado. Esta solución permite eliminar el refuerzo tradicional con varias ventajas en términos de calidad y reducción de costes. A raíz de esto, se ha hecho el estudio en elementos prefabricados utilizados en el Túnel de Base de Brennero, de carácter ferroviario proyectado a través del Paso del Brennero en los Alpes y que conecta Austria con Italia. Se han realizado ensayos a gran escala tanto en

hormigón armado tradicional como en elementos reforzados con fibras. En particular, se realizaron ensayos a flexión para comparar el comportamiento de los segmentos, mientras que también se desarrollaron pruebas de carga puntual con el objetivo de simular el empuje inducido por la máquina de perforación de túneles, y luego el efecto de la concentración de carga y los fenómenos de agrietamiento. Los resultados de las pruebas mostraron que, en esta aplicación peculiar, el hormigón armado con fibras puede sustituir el refuerzo tradicional; en particular el rendimiento del segmento es mejorado por la presencia de fibra, principalmente en términos de control de fisuración. Con el fin de comprobar la viabilidad y la eficacia de la propuesta técnica para el caso estudiado, se desarrollaron pruebas a gran escala en segmentos de túnel sometidos a flexión y fuerzas puntuales. Los resultados obtenidos mostraron cómo el hormigón armado con fibras puede ser adoptado con éxito para este tipo de estructuras, para la limitación de la fisuración que es la principal preocupación. De hecho, los elementos de hormigón fibro-reforzado ensayados a flexión mostraron un mejor comportamiento en términos de control de fisuración con respecto a un segmento de hormigón armado tradicional; la carga relacionada a la primera formación de grietas fue mayor, y las grietas se redujeron. No obstante, con el fin de lograr buenos resultados, se requiere un diseño preciso del material y de la estructura. Además, con tal de obtener una optimización del proceso de construcción se puede llegar a la elección de elementos de hormigón fibro-reforzado debido a su buen rendimiento y bajo costo. (Caratelli, Meda, Rinaldi, & Romualdi, 2010)

2.3.1.2. Distribución y orientación de las fibras

Actualmente, múltiples estudios apuntan a que la distribución y orientación de las fibras influyen directamente en el comportamiento del hormigón. A partir de ello, se hizo una investigación de este fenómeno en las dovelas prefabricadas de hormigón de la L9 del Metro de Barcelona, basándose en la determinación mediante el ensayo de Barcelona de la carga y la tenacidad de testigos extraídos en distintas posiciones de las dovelas, y en la posterior determinación de la cuantía de fibras. Con ello, se pudo evidenciar que las probetas extraídas de la parte central de la dovela experimentan un aumento notorio en las cargas y tenacidades medidas con el ensayo BCN, con respecto a la parte inferior de los extremos de la misma donde se produce un reflujó de hormigón cuando se llena el molde, de hecho las cuantías máximas se generan en la parte inferior de dicho borde. Tales resultados se condicen con Kooiman (2000), quien realizó estudios experimentales sobre la distribución de las fibras en elementos estructurales reales, pudiendo observar que el llenado del molde producía orientaciones preferentes en la dirección de sus bordes extremos, mientras que en la fase de vibrado se producía una segregación de las fibras que las acumulaba en la parte inferior y un mayor grado de orientación horizontal, tal y como se muestra en la Figura 7. (Molins & Mora, 2007)

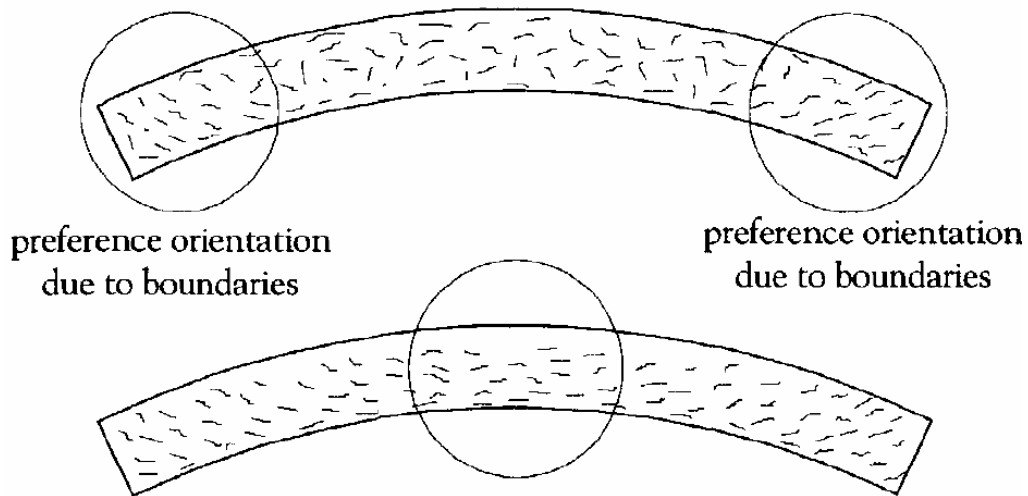


Figura 7: (a) Orientación de las fibras debido a los bordes del molde (b) Efecto del vibrado. (Molins & Mora, 2007)

2.3.1.3. Ventajas y desventajas del uso de fibras de polipropileno respecto a las de acero

Es necesario mencionar que las fibras de acero dan mejores resultados de forma inmediata en el estado endurecido, a pesar de ser más costosas, en cambio, las de polipropileno no son tan utilizadas en el diseño debido a su bajo módulo de elasticidad en comparación con el del hormigón, aunque son usadas comúnmente para otros fines (Irias Pineda, 2013). En Chile, en cuanto al tipo de fibra que se utiliza en la práctica para mejorar las propiedades del hormigón, no se tiene ninguna convención de cuál es mejor estructuralmente. Actualmente, de manera general, se usan las fibras de acero y en menor cantidad, las de polipropileno, teniéndose grandes diferencias entre éstas. Frente a esta situación, es que se ha estudiado la mezcla de hormigón con fibras de acero encontrando la existencia de pérdidas significativas de capacidad residual a medida que pasa el tiempo, fenómeno atribuible seguramente a la corrosión de las fibras. Presumiblemente las fibras de polipropileno no presentan este fenómeno temporal, pues no se corroen. (Nazar, 2016)

Dado que el desempeño del HRF dependerá de la fibra usada (de su forma, tamaño, material, etc.), y lo anterior es un factor propio de cada proveedor de fibras, es muy difícil entonces establecer categóricamente que las fibras de determinado material sean superiores a otras de otro material. Sólo es posible hacer comparaciones entre fibras de determinados fabricantes, y sacar conclusiones muy generales del material de cada fibra. Y entendiendo que las fibras de polipropileno son relativamente nuevas en el mercado en comparación a las de acero, se necesita mayor investigación asociada a la durabilidad y el desempeño no estructural de estas fibras, así como también el desempeño estructural en el tiempo. Las fibras de acero se han ocupado desde hace mucho, por lo que casi toda la experiencia sobre el uso de fibras viene de las de acero. Como punto a favor de las fibras de polipropileno, se ha constatado que los contratistas las prefieren porque generan menos problemas con las bombas (son más flexibles y por ende no generan taponamientos del pitón) y además gastan menos las boquillas y mangueras. (Nazar, 2016)

2.4. Aplicaciones

2.4.1. Hormigón Proyectado

El hormigón proyectado posee excelente adherencia a múltiples sustratos, incluyendo roca, hormigón, albañilería y acero. Se adapta a una amplia gama de aplicaciones en soporte de suelo, revestimientos y edificación.

La aplicación del hormigón proyectado se puede dividir en dos métodos principales, shotcrete manual y shotcrete con equipos robotizados. El shotcrete manual se utiliza generalmente para aplicaciones en la construcción civil y reparación de hormigones. El shotcrete mecanizado se utiliza en aplicaciones de minería y construcción de túneles subterráneos y es ideal para aplicaciones sobre cabeza y en secciones de gran tamaño para taludes y túneles. El shotcrete robotizado, en los casos en los que el acceso y la altura estén dentro del alcance del equipo, puede también ser usado para la estabilización de taludes en minas a cielo abierto. En la construcción de carreteras y ferrocarriles es más común que se adopte el shotcrete manual por las restricciones de espacio y la aplicación en taludes, para esos casos el uso de plataformas elevadoras permite al pitonero llegar a las zonas más altas y distantes. Hay otros métodos más especializados disponibles para la aplicación mecanizada como los equipos de shotcrete montados en tuneladoras. (ICH, 2015)

2.4.2. Hormigón Reforzado con Fibra (HRF)

Actualmente, el hormigón reforzado con fibras de polipropileno es empleado ampliamente en los Estados Unidos y Canadá en todo tipo de construcciones (UNE N., 1989). Entre las diversas aplicaciones de este tipo de concreto, la de construcción de pavimentos y revestimientos de túneles con concreto reforzado con fibras de acero han tenido gran éxito. También cabe destacar su aplicación en el ámbito militar, utilizándose en hangares y recintos protegidos contra el impacto de metralla o proyectiles. (López, 2015)

Otros países, como Argentina y Chile, continúan realizando investigaciones sobre el comportamiento en el laboratorio de hormigones reforzados con fibras (acero y sintéticas). Por su parte, Chile ya ha aplicado las fibras de acero en la construcción de estabilización de taludes, pavimentos en carreteras, pistas de aeropuertos y hangares, pistas industriales y comerciales, cimentaciones para equipo y maquinaria, etc. (López, 2015)

2.5. Normativa, Ensayos y Mediciones

2.5.1. Ensayos y Mediciones en Estado Fresco

En este ámbito, existen numerosos ensayos que se han desarrollado con el fin de determinar las propiedades del hormigón proyectado. Los principales utilizados en Chile son: el método de asentamiento del cono de Abrams (NCh1019.Of74), ensayo de la mesa de sacudidas (EN 12350-5), la temperatura de la mezcla (ASTM C1064), densidad y contenido de aire del hormigón fresco (NCh2184.Of92) y el contenido de fibras (EN 14488-7).

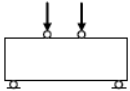
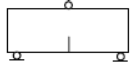
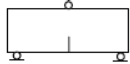
2.5.2. Ensayos en Estado Endurecido

En la actualidad existe gran variedad de ensayos para medir distintas propiedades del hormigón en estado endurecido. Por un lado, la resistencia del hormigón puede ser cuantificada con ensayos de absorción de energía en paneles, los cuales entregan una evaluación de la capacidad de carga residual del concreto a través de la determinación del área bajo la curva carga/deformación. Este tipo de ensayo está más bien ligado a la evaluación del soporte del shotcrete antes de colapsar mediante la estimación de las deformaciones a las que se puede llegar durante el servicio, descuidando el análisis del aporte estructural de los materiales. Las normas que comúnmente se utilizan para estos ensayos en Chile son: EN14488-5 para paneles cuadrados y la ASTM C1550 para paneles redondos.

El rango de selección de un procedimiento de medición a seguir depende mayoritariamente al objetivo que se desea llegar. Como esta investigación se centra en la evaluación de la resistencia que desarrolla el hormigón proyectado luego de que se generan fisuras en la matriz enfocado al comportamiento estructural de los materiales, se tiene un conjunto de normas a las que se puede acceder para este análisis bajo distintos estándares. A modo general, se tiene un pequeño listado mostrado en la Tabla 1, en donde se aprecian las distintas normativas vigentes que permiten caracterizar el comportamiento del hormigón luego de la fisura.

Por otro lado, es necesario saber la resistencia del hormigón a 28 días. Para ello, se deben realizar ensayos a compresión de probetas. En este caso, se realiza esta medición en probetas cilíndricas según la norma NCh1037.Of77.

Tabla 1: Propiedades de algunos ensayos para caracterizar el Hormigón Reforzado con Fibra. Se tiene que l_f es el largo de la fibra, mientras que b , d y l son el ancho, el alto y el largo de la viga (Carmona, 2014).

Ensayo	Configuración	Dimensiones probeta (mm × mm × mm)	Parámetros para caracterizar HRF
ASTM C – 1018		100 × 100 × 350	Resistencia primera fisura
ASTM C – 1609			Índices tenacidad Cargas residuales Tenacidad
NBN 15 – 238		150 × 150 × 600	Energía absorbida Resistencia flexión equivalente
UNE 83 – 510 – 89		$d/b < 1,5; l = 3d$	Energía absorbida
JCI SF4		$d = b = 100$ mm $l = 3d + 80$ mm	Energía absorbida Resistencia a flexión equivalente
		$d = b = 150$ mm $l = 3d + 80$ mm	
RILEM 162 – TDF		150 × 150 × 550	Resistencia a flexión Cargas residuales Área bajo la curva $P - \delta$
EN – 14651		150 × 150 × 550	Resistencia a flexión Límite proporcionalidad Resistencias residuales

2.5.2.1. Ensayo a Flexotracción (Resistencia Residual)

Este ensayo permite caracterizar el comportamiento del hormigón endurecido durante su fase antes del agrietamiento, y luego de su fisuración, lo cual es sumamente importante al momento de querer cuantificar el aporte del refuerzo de la mezcla en la resistencia a la flexotracción de las probetas. En este caso, se recurrirá a la norma europea EN 14651¹, la cual permite obtener curvas de carga en función de la deformación en base al ensayo de muestras prismáticas que, por requerimiento del procedimiento, deben tener una ranura con cierta profundidad en la parte central del largo de la viga atravesando el ancho de la probeta. Esto con el objeto de que en el momento de que sea cargado el prisma, la fisura comience justo en esta irregularidad. Esta ranura es comúnmente llamada *entalla*.

Esta prueba debe ser hecha en una prensa que cumpla con los requerimientos mínimos establecidos en la norma. La deformación de las piezas de hormigón se puede medir de dos maneras distintas: una de ellas es medir la flecha desde la parte central e inferior de la viga, y la otra es medir la apertura de la grieta o *CMOD* (*Crack Mouth Opening Displacement*).

Las probetas confeccionadas tienen que tener dimensiones de $150 \times 150 \times L$ con $550[mm] \leq L \leq 700[mm]$ a las que, posteriormente, se les realiza entalla. Además, se debe cumplir que el hormigón contenga áridos de 32 [mm] de tamaño máximo y/o fibras de longitud máxima de 60 [mm].

¹ Notar que esta norma está pensada para determinar la resistencia a la tracción por flexión del hormigón reforzado con fibras de acero, pero es ampliamente usada en probetas moldeadas confeccionadas con fibras sintéticas.

Cabe mencionar que, como requerimiento de la entalla, se exige que debe hacerse en el ancho de la sección central de la probeta, quedando perpendicular al eje longitudinal de la misma, y se debe hacer en una cara tal que, si la entalla está de forma horizontal, la cara de llenado quede vertical. En cuanto a sus dimensiones, se tiene que la anchura debe ser inferior o igual a 5 [mm], con una profundidad de 25 [mm] \pm 1 [mm]. De esta forma, se describe la distancia h_{sp} como la que queda de altura en la parte central menos la entalla como la que se muestra en la sección A-A de la Figura 8.

El primer paso antes de comenzar con el ensayo es medir las dimensiones reales de la probeta, esto es: el ancho (b), la distancia entre el fondo de la entalla y la cara superior de la viga (h_{sp}) y la longitud media de la luz (l). Posteriormente, la configuración del ensayo en la prensa contempla la instalación de un marco en el prisma de hormigón que ayuda a fijar el dispositivo que posteriormente hará las mediciones de las deformaciones una vez que comience el ensayo, tal y como se muestra en la Figura 8. Luego, se establece que, en caso de que la máquina de ensayo controle la velocidad de crecimiento del $CMOD$, existen dos intervalos de magnitud, en donde primero controla una velocidad constante de 0.05 mm/min, y luego, en $CMOD = 0.1$ [mm], se impone una velocidad constante de 0.2 mm/min. El ensayo termina cuando $CMOD$ es superior o igual a 4 [mm].

En cuanto a la relación entre la flecha y el $CMOD$, la norma sugiere esta aproximación de equivalencia:

$$\delta = 0.85 \cdot CMOD + 0.04 \quad (1)$$

Donde:

δ [mm] es la flecha;

$CMOD$ [mm] es el valor del $CMOD$ en el caso de una distancia entre la parte inferior de la probeta y la línea de medición en $y = 0$.

Además, la norma dice que en el caso de que la línea de medición se sitúe a una distancia y por debajo de la parte inferior de la probeta, el valor de $CMOD$ debe deducirse a partir del valor medido $CMOD_y$ con la siguiente expresión:

$$CMOD = CMOD_y \cdot \left(\frac{h}{h + y} \right) \quad (2)$$

Siendo:

h la altura total de la probeta.

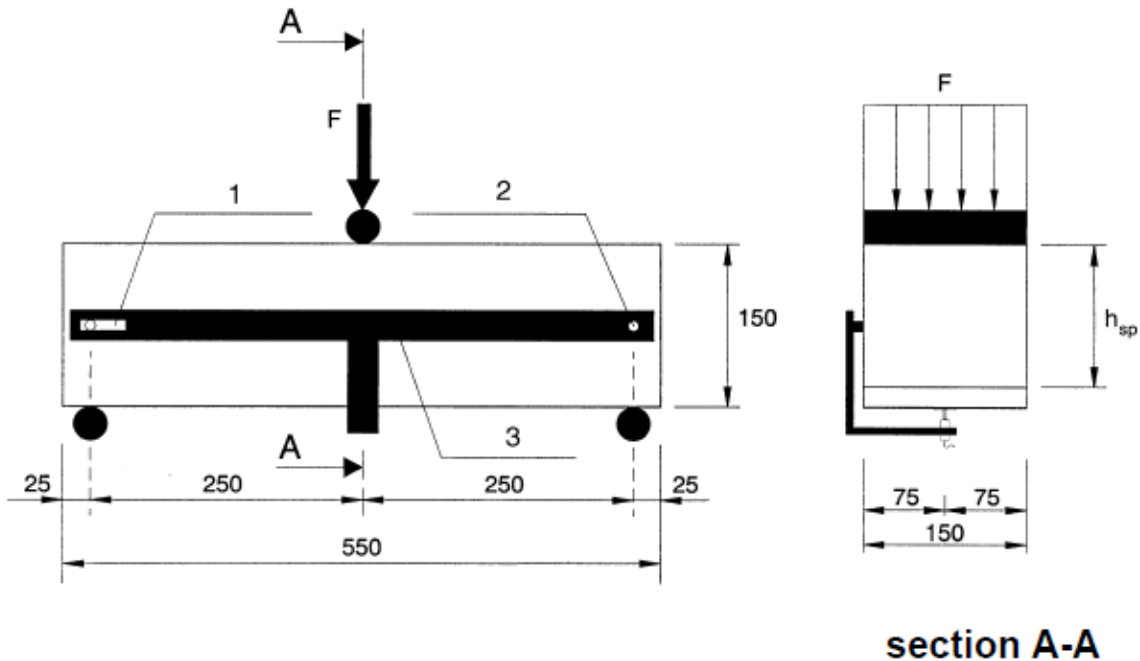


Figura 8: Configuración de la instalación de la probeta para el ensayo EN 14651, donde '1' muestra el dispositivo de fijación deslizante; '2', el dispositivo de fijación rotativa; y '3', el bastidor rígido. (20)

Por otro lado, el Límite de Proporcionalidad (LOP) se define como la tensión en el fondo de la entalla que se supone actúa en un estado no agrietado de la probeta, bajo el supuesto de una distribución lineal de tensiones. De acuerdo a esto, se tiene que:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (3)$$

Donde:

$f_{ct,L}^f$ [MPa] es el LOP;

F_L [N] es la carga correspondiente al LOP;

l [mm] es la longitud del vano;

b [mm] es la anchura de la probeta;

h_{sp} [mm] es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta.

Cabe señalar que el valor de F_L corresponde a la mayor carga en el intervalo de deformación de flecha o CMOD de cero a 0.05 [mm].

La Resistencia Residual a la Tracción por Flexión ($f_{R,j}$) se define como la tensión ficticia que se supone actúa en una sección no agrietada en el centro del vano de la probeta bajo cierta carga puntual y cierta deformación. Su expresión tiene la forma que sigue:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (4)$$

Siendo:

$f_{R,j}$ [MPa] es la resistencia residual a la tracción por flexión;

F_j [N] es la carga correspondiente;

l [mm] es la longitud de vano;

b [mm] es la anchura de la probeta;

h_{sp} [mm] es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta.

Las resistencias residuales más importantes son mostradas en la Figura 9.

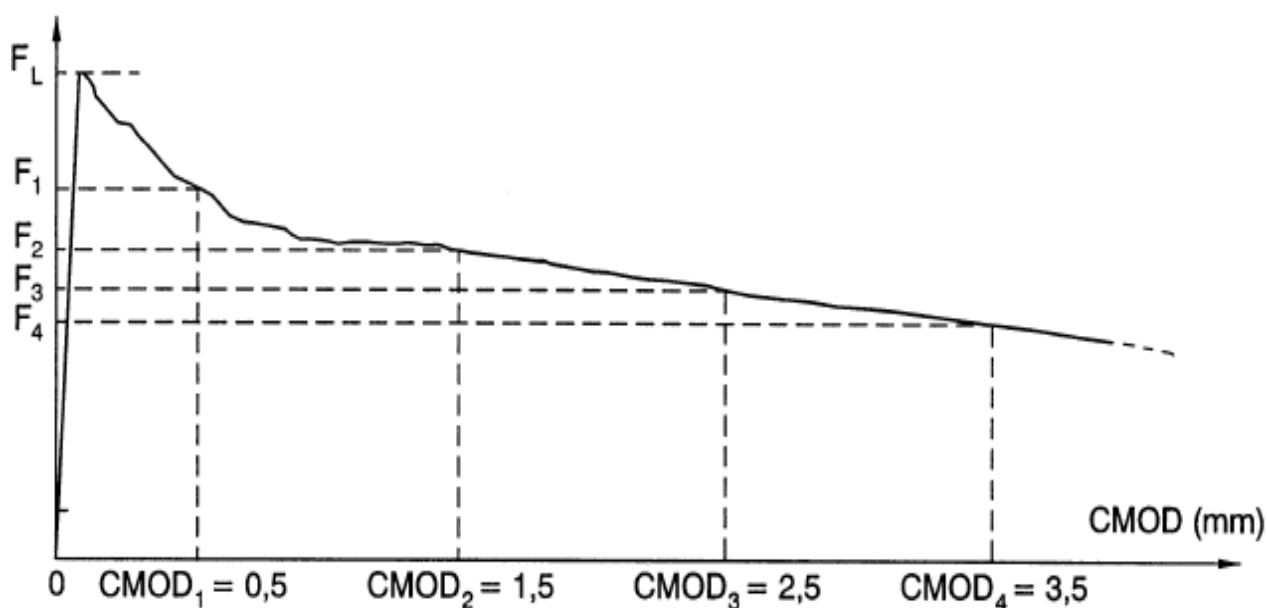


Figura 9: Curva de carga en función del CMOD con F_j ($j = 1,2,3,4$) del ensayo EN 14651.

2.5.3. Normativa para evaluar funcionalidad estructural de la fibra en el hormigón

2.5.3.1. EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural

Con el fin de analizar la contribución estructural de las fibras, se recurre al documento español EHE-08, que de acuerdo al Artículo 31.4 *Valor Mínimo de la Resistencia* del Anejo 14, para que las fibras puedan ser consideradas con función estructural, la resistencia característica residual a la tracción por flexión $f_{R1,k}$ no debe ser inferior al 40% del límite de proporcionalidad y $f_{R3,k}$ no tiene que ser inferior al 20% del límite de proporcionalidad. En otras palabras, las condicionantes son:

$$\frac{f_{R1,k}}{LOP_k} \geq 40\% \quad (5)$$

$$\frac{f_{R3,k}}{LOP_k} \geq 20\% \quad (6)$$

2.5.3.2. EN 14889-2 Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad

Por otro lado, existe otro criterio de medición del efecto de la fibra sobre la resistencia del hormigón propuesto por la norma española EN 14889-2, estableciendo que se debe alcanzar una resistencia residual a flexión de 1,5 [MPa] a un CMOD de 0,5 [mm] (equivalente a 0,47 [mm] de flecha central) y una resistencia residual a flexión de 1 [MPa] para un CMOD de 3,5 [mm] (equivalente a 3,02 [mm] de flecha central). Tales indicaciones se resumen como:

$$f_{R1,k} \geq 1,5 \text{ [MPa]} \quad (7)$$

$$f_{R4,k} \geq 1 \text{ [MPa]} \quad (8)$$

2.5.3.3. Model Code 2010

En la misma línea, el Model Code (2010) propone que el refuerzo de fibra en el hormigón puede sustituir el refuerzo convencional en el estado de límite último si es que las siguientes relaciones son ciertas:

$$f_{R1,k}/LOP_k > 0,4 \quad (9)$$

$$f_{R3,k}/f_{R1,k} > 0,5 \quad (10)$$

Capítulo 3. Materiales

3.1. Cemento

El cemento usado para la confección de los hormigones de esta investigación corresponde a un Cemento Melón Extra, el cual es formulado en base de clinker, puzolana y yeso. Según la norma NCh148.Of68, este material cae en la Clase Portland Puzolánico, Grado Alta Resistencia.

Según las características entregadas por la empresa fabricante, se tiene la información técnica especificada en la Tabla 2.

Tabla 2: Información Técnica Melón Extra.

Variable de control	Melón Extra	Requerimiento NCh148.Of68
Fraguado Inicial [minutos]	90	>45
Fraguado Final [minutos]	125	<600
Superficie Específica Blaine [cm^2/gr]	5000	-
Peso específico [gr/dm^3]	3,00	-
Resistencia a compresión a 7 días [kg/cm^2]	420	>250
Resistencia a compresión a 28 días [kg/cm^2]	500	>350
Resistencia a flexotracción a 7 días [kg/cm^2]	65	>45
Resistencia a flexotracción a 28 días [kg/cm^2]	75	>55
Pérdida por calcinación [%]	2,0	<4,0
Residuo insoluble [%]	12,0	<30
Contenido de SO3 [%]	3,5	<4,0

3.2. Áridos

Este material es sumamente importante en la mezcla, ya que conforma la mayor parte de la masa del hormigón, por lo que determina en gran parte su comportamiento.

Los hormigones proyectados consideran como agregados pétreos aquellos clasificados como arenas. En este escenario, hay dos consideraciones que se deben tomar en cuenta en el diseño: una es que, generalmente el uso de arenas más finas resulta en mayor retracción, mientras que la adición de arenas gruesas aumenta el efecto

de rebote en la proyección de la mezcla. Es por ello, que comúnmente se utilizan bandas combinadas para la confección de una proporción de áridos adecuada. El método mayormente utilizado es el propuesto por EFNARC, ya que entrega una tolerancia y flexibilidad a la inclusión del tamaño y distribución de los áridos.

Las arenas utilizadas fueron extraídas originalmente de la ribera del Río Maipo, ubicado en la Región Metropolitana, las cuales fueron sometidas a los ensayos correspondientes en el Centro de Investigación y Desarrollo IDIEM. Las características fueron agrupadas en la Tabla 3 y fueron determinadas según los procedimientos estipulados en:

- NCh165Of.77 Determinación de la granulometría.
- NCh1116Of.77 Determinación de las densidades aparentes.
- NCh1239Of.77 Determinación de las densidades real y neta, y la absorción de agua.
- NCh1223Of.77 Determinación del contenido de materiales finos menores a 0.08 [mm].

Además, la distribución de áridos hecho según el criterio EFNARC, arrojó una combinación del 80% de arena gruesa y 20% de arena fina, teniéndose la granulometría mostrada en la Figura 10.

Tabla 3: Características principales de las arenas utilizadas.

Característica	Arena Gruesa	Arena Fina
Tamaño máx. nominal [mm]	9,5	9,5
Módulo de Finura	3,08	2,06
Finos bajo malla 0.08 [%]	3,0	2,9
Densidad real seca [kg/m^3]	2642	2586
Densidad real SSS [kg/m^3]	2685	2636
Densidad Neta [kg/m^3]	2761	2723
Absorción [%]	1,6	1,9

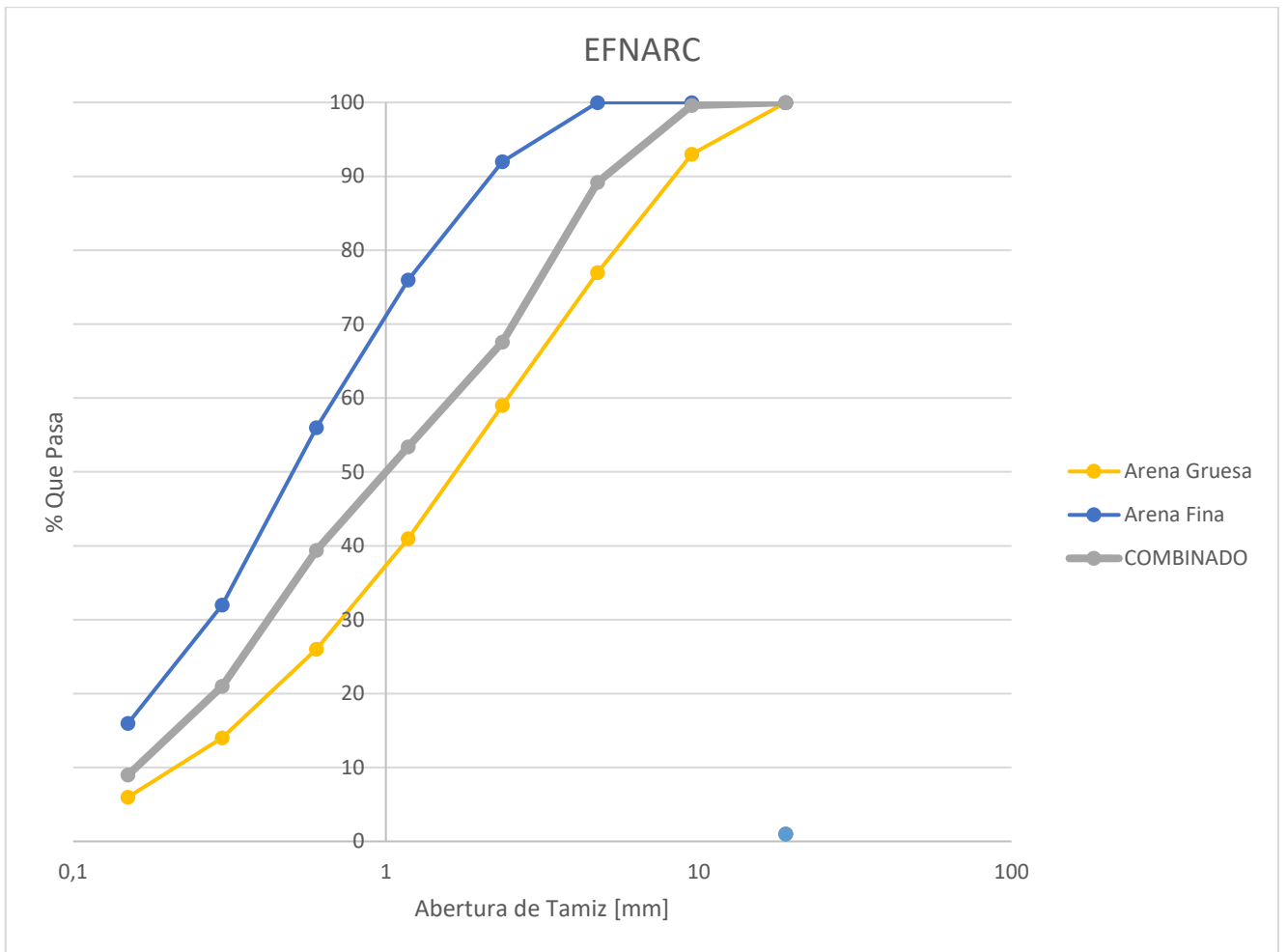


Figura 10: Granulometría con ajuste EFNARC de las arenas a utilizar.

3.3. Fibras

La fibra sintética utilizada en este estudio corresponde una hecha en base a polímero de olefina y es clasificada como estructural, por lo que cae en la denominación de macrofibra. El proveedor de este material es Elasto Plastic Concrete, y el producto es del tipo BarChip 48 que comercialmente es altamente usada. Un punto importante a notar es que la fabricación de estas fibras cumple con la norma internacional ISO9001, lo cual da cierto tipo de seguridad en cuanto al cumplimiento de sus propiedades, las cuales son mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4: Características de la fibra sintética BarChip48.

Característica	Propiedad del Material
Base de la resina	Olefina modificada
Largo [mm]	48
Resistencia a la tensión [MPa]	640
Textura de su superficie	Relieve continuo
N° de fibras por kilogramo	59500
Gravedad específica	0,90-0,92
Módulo de Young [GPa]	10
Punto de fusión [°C]	159-179
Punto de ignición [°C]	Mayor a 450

3.4. Aditivos

La confección de los hormigones de esta investigación fue hecha con la incorporación de dos tipos de aditivos: uno plastificante y otro superplastificante, con el objeto de igualar lo más posible las condicionantes que intervienen en la fabricación real de los hormigones proyectados. Esta integración de aditivos provoca esencialmente que se reduzca el agua de amasado sin intervenir en la relación agua/cemento de las mezclas, aumentando de esa forma la trabajabilidad en estado fresco.

3.4.1. Plastificante

El aditivo usado como plastificante es llamado Plastocrete MX-1390, el cual es un reductor de agua con efecto retardador para hormigón, por lo que cae en la clasificación de tipo D, según la norma ASTM C494. Básicamente este producto reduce el agua de amasado, aumentando las resistencias mecánicas del hormigón, además, retarda el tiempo de fraguado, lo que permite el transporte de la mezcla en tiempos calurosos y frente a una larga distancia.

Normalmente, se recomienda una dosis de 0,4% a 0,7% con respecto al peso del cemento, aunque se pueden usar otras con los ensayos previos correspondientes.

3.4.2. Superplastificante

Como superplastificante se utilizó el producto Viscocrete 40HSCL, diseñado para obtener una importante reducción de agua de amasado, lograda mediante su absorción superficial y efecto estérico de separación espacial de las partículas de cemento. Debido a las características presentes, este aditivo cae en la clasificación tipo F de acuerdo a la norma ASTM C494, por ser un reductor de agua de alto rango.

Este producto suele usarse en dosis que van desde 0,5% a 1,5% del peso del cemento, dependiendo del efecto al que se quiera llegar en la mezcla. Para la estimación de la dosis buscada, se ha de realizar una variedad de ensayos previos.

Capítulo 4. Programa experimental y Resultados

4.1. Definición de variabilidad de los hormigones

En primer lugar, se definieron los límites de las variables del estudio, esto es:

- Resistencias de los hormigones: Se pretende considerar un rango de resistencias para este trabajo experimental basándose en la modificación de la relación agua/cemento en la dosificación de las mezclas. La resistencia a compresión real para este programa se mide en probetas cilíndricas de 150×300 [mm]. La correlación entre la resistencia y la relación a/c es mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5: Relación a/c asumida para cada resistencia de hormigón propuesta.

Nomenclatura	f'_c [MPa]	Relación a/c
G20	20	0,85
G30	30	0,70
G40	40	0,57
G50	50	0,43
G60	60	0,29

- Dosificación de fibra de polipropileno: Se desea alterar la cantidad de fibra en los hormigones con el cuidado de considerar el rango normal de dosis en el hormigón proyectado, teniéndose desde hormigones sin fibra hasta con un máximo de 8 [kg/m^3].

Luego, se acotó la variabilidad de la dosificación de fibra de polipropileno por cada resistencia de hormigón a: $0, 2, 4, 6$ y 8 [kg/m^3], teniéndose una cantidad total de veinticinco hormigones contemplados en el plan experimental.

4.2. Propiedades de los hormigones en estado fresco

Durante la confección de las mezclas, se midieron ciertos parámetros característicos de los hormigones proyectados, como el cono de Abrams, la temperatura, el contenido de aire y la densidad del hormigón. Con ello, se tuvieron los resultados mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6: Propiedades de los hormigones en estado fresco.

Grado Hormigón	f'_c [MPa]	Cantidad de fibra [kg/m ³]	Propiedad			
			Cono [cm]	T [°C]	Aire [%]	Densidad [ton/m ³]
G20	20	0	28,5	21,8	0,50	2,247
		2	28,4	24,0	0,30	2,264
		4	28,0	26,9	0,40	2,223
		6	26,5	24,2	1,50	2,254
		8	27,5	20,0	0,30	2,273
G30	30	0	28,5	23,2	1,50	2,290
		2	28,4	22,0	0,35	2,315
		4	28,0	29,5	0,55	2,311
		6	27,0	24,3	0,80	2,314
		8	26,0	19,7	0,50	2,331
G40	40	0	28,3	23,0	2,85	2,364
		2	27,0	25,1	0,60	2,383
		4	28,0	24,5	3,90	2,297
		6	26,0	20,9	1,80	2,369
		8	25,5	20,8	1,20	2,400
G50	50	0	25,6	25,6	4,20	2,415
		2	23,5	27,3	3,80	2,402
		4	26,5	26,2	4,60	2,393
		6	24,5	20,8	2,20	2,440
		8	21,0	20,6	0,10	2,431
G60	60	0	24,3	25,5	2,10	2,441
		2	25,0	26,9	3,60	2,425
		4	22,5	24,2	4,00	2,416
		6	23,5	20,7	3,10	2,425
		8	22,5	18,8	1,70	2,477

4.3. Propiedades de los hormigones en estado endurecido

4.3.1. Ensayos de resistencia a compresión.

Para cada hormigón se confeccionaron dos cilindros de 150 [mm] de diámetro y 300 [mm] de largo, con el objetivo de ensayarlos a compresión a 28 días. Los resultados son mostrados en la Tabla 7, y para notar la tendencia que admite el hormigón en su resistencia a la compresión al agregarle fibra de polipropileno, se tiene la Figura 11.

Tabla 7: Resultados de la resistencia a compresión de las muestras a los 28 días de curado.

Grado Hormigón	Cantidad de fibra [kg/m^3]	Resistencia a Compresión [MPa]
G20	0	25,20
	2	22,95
	4	15,45
	6	16,70
	8	15,60
G30	0	40,45
	2	34,45
	4	35,50
	6	30,10
	8	28,20
G40	0	50,95
	2	49,20
	4	39,90
	6	44,40
	8	45,45
G50	0	66,85
	2	68,50
	4	58,25
	6	65,30
	8	59,85
G60	0	66,95
	2	73,80
	4	70,50
	6	56,40
	8	60,65

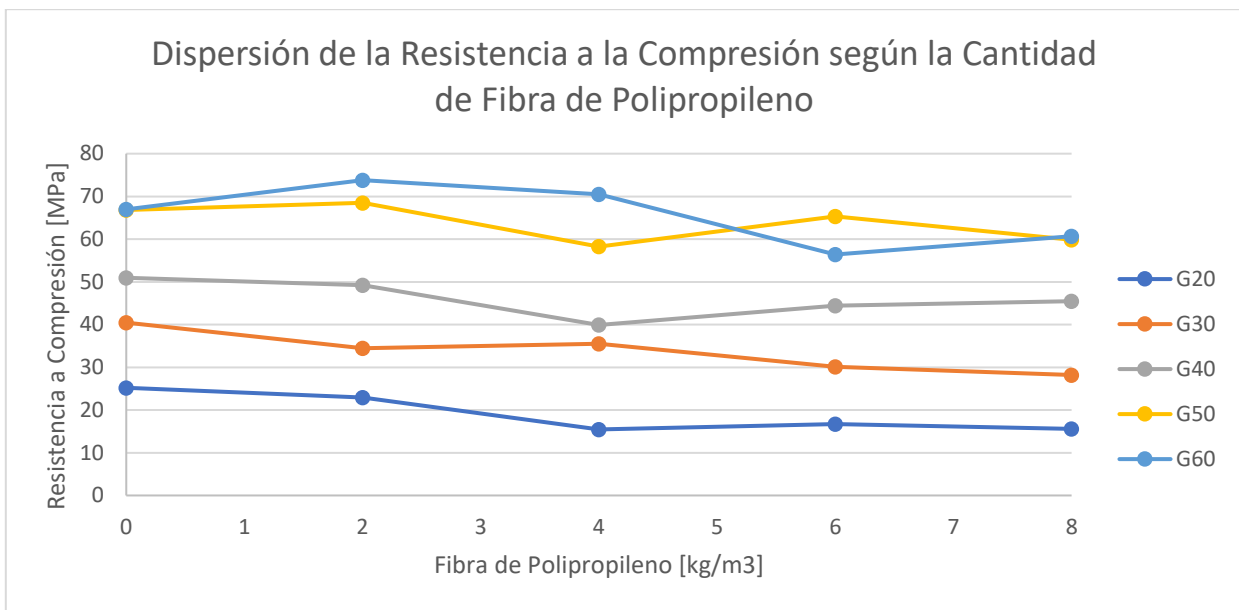


Figura 11: Resistencia a la compresión del hormigón variando la cantidad de fibra de polipropileno.

En esta sección es necesario aclarar que en las confecciones de los hormigones de la serie con nomenclatura G60 se tuvieron problemas, pues debido a la baja relación a/c asociada a la dosificación, las mezclas tendían a tomar un aspecto seco que propiciaba la formación de bolones debido a que el agua total no era suficiente para la hidratación del cemento contenido. Por esta razón, se decidió aumentar la cantidad de agua de amasado hasta obtener una mezcla apta para la elaboración de las probetas. Esta situación condicionó que esta serie tuviera mayor similitud con la dosificación de los concretos G50, lo cual se refleja en los resultados de los ensayos a compresión mostrados en la Figura 11.

Se puede notar que las resistencias a compresión tienen ciertas tendencias a disminuir sus valores a medida que se le agrega fibra de polipropileno, aunque tal como se observa en la Figura 11, no es tan notorio como para afirmarlo en su totalidad. Aun así, se puede establecer que disminuyó la resistencia si es que se comparan los hormigones patrón y los más saturados con fibra, llegando a tenerse diferencias de hasta 12 [MPa]. De hecho, una de las mayores diferencias porcentuales se dio para la mezcla con menor porción de cemento, obteniéndose una caída del 38% de la resistencia a la compresión en aquel hormigón con 8 [kg/m³] de fibra respecto al sin fibra.

Una de las razones que pueden explicar este fenómeno de descenso de la resistencia a compresión, es el método de ensayo utilizado, ya que la prensa posee cierta sensibilidad que supone la resistencia como aquella aplicada en el momento del desarrollo de una grieta con una determinada deformación. Para este caso, las fibras de polipropileno pueden constituir más que un refuerzo, una singularidad o punto débil por donde se alcanzan a generar grietas de falla, lo cual desde el punto de vista estructural no significa que el elemento falle, pero bajo la configuración de la máquina de ensayo se interpreta como un estado final de la probeta.

4.3.2. Resultados de ensayos de resistencia a la flexotracción

Los ensayos de resistencia a la flexión fueron hechos siguiendo las indicaciones especificadas en la normativa EN 14651. Las probetas confeccionadas poseen dimensiones de $150 \times 150 \times 600$ [mm], y por cada tipo de hormigón se tienen seis de estos prismas. Los ensayos fueron hechos en su mayoría en una prensa de resistencia residual marca *ToniTechnik*, con la que se obtenían las curvas de carga en función de la flecha, por lo que se recurre a la expresión sugerida por la norma para el cambio de la deformación vertical a CMOD, especificada en la ecuación (1). Luego, por limitaciones propias del laboratorio², los últimos hormigones fueron ensayados en un equipo marca *Controls*, específicamente aquellos correspondientes a la nomenclatura: G40F6, G50F6, G60F6, G20F8, G30F8, G40F8, G50F8 y G60F8. Para estos casos, se tiene inmediatamente las series de datos de carga versus CMOD, aunque se debe trabajar con la ecuación (2) para corregir la diferencia de altura de 18 [mm] en la medición de la apertura de la grieta en la probeta. En cada ensayo, se recurre a lo indicado en (3) con el fin de obtener las resistencias residuales a la tracción por flexión para ciertas deformaciones señaladas en la norma. En la Figura 12 se muestra la instalación de una probeta en el momento justo antes de comenzar el ensayo en ambas prensas.



Figura 12: Ensayo de Resistencia residual con las prensas de resistencia residual, marca *ToniTechnik* (a la izquierda) y *Controls* (a la derecha).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a flexotracción, incorporándose la curva tendencial de las series involucradas, constituida como el promedio de las curvas de los resultados considerados. Cabe mencionar que fueron suprimidas aquellas series de datos que contienen errores por problemas con la máquina o que simplemente se alejaron demasiado del comportamiento general del HRF, lo que les quitó representatividad.

Además, se incorpora el coeficiente de variación porcentual con el objeto de demostrar con facilidad la variabilidad entre las series de datos de una misma mezcla.

² Durante esta etapa se tuvo que lidiar con diversas dificultades operativas. El principal inconveniente fue la disponibilidad del equipamiento necesario para la realización de los ensayos. El traslado de la prensa de resistencia residual desde Santiago a la ciudad de Calama condujo a que las probetas tuvieran que ser enviadas a ese lugar para efectuar sus ensayos. Posteriormente, se recurrió al apoyo de la UTFSM para la finalización de éstos en sus laboratorios ubicados en Valparaíso.

Los resultados de las resistencias a flexión son mostrados desde la Tabla 8 hasta la Tabla 32; y las curvas de cargas en función de la deformación son expuestos desde la Figura 13 hasta la Figura 37.

Tabla 8: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G20F0	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,1187	1,24	2,21	0,42	0,07	0,03	0,02
2	0,1519	1,36	2,21	1,03	0,29	0,29	0,29
3	0,1398	0,86	2,08	0,91	0,30	0,30	0,30
4	0,2141	0,87	2,01	0,91	0,13	0,05	0,02
5	0,1453	1,38	2,14	0,65	0,39	0,39	0,39
6	0,1753	0,87	1,70	0,68	0,12	0,04	0,00
C.V.	21%	23%	9%	29%	59%	89%	103%

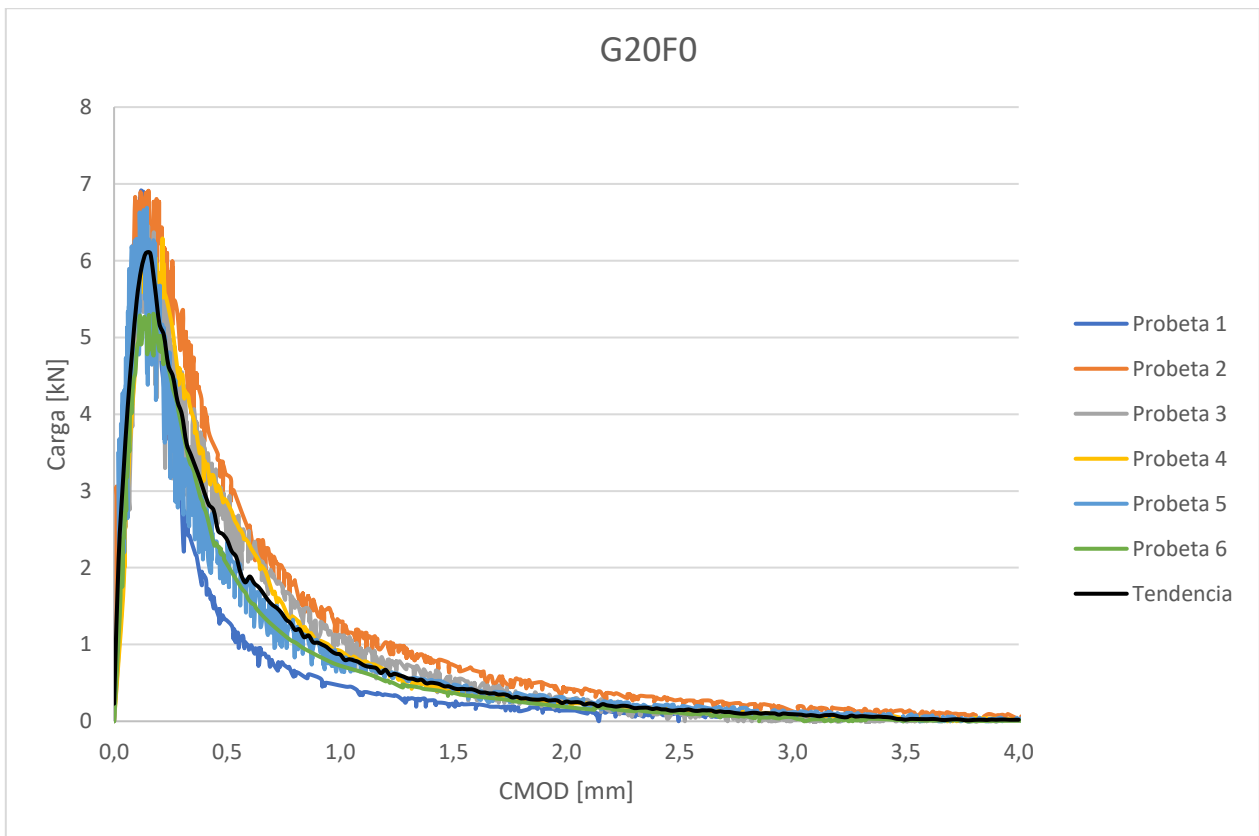


Figura 13: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 9: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G20F2	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0492	2,73	2,73	0,42	0,49	0,53	0,45
2	0,0471	3,21	3,21	0,42	0,39	0,38	0,34
3	0,0000	3,39	3,39	0,45	0,55	0,56	0,56
4	0,0486	3,48	3,48	0,48	0,59	0,63	0,55
5	0,0471	3,06	3,06	0,25	0,25	0,25	0,22
6	0,0000	3,63	3,63	0,45	0,56	0,52	0,47
C.V.	77%	10%	10%	20%	28%	29%	31%

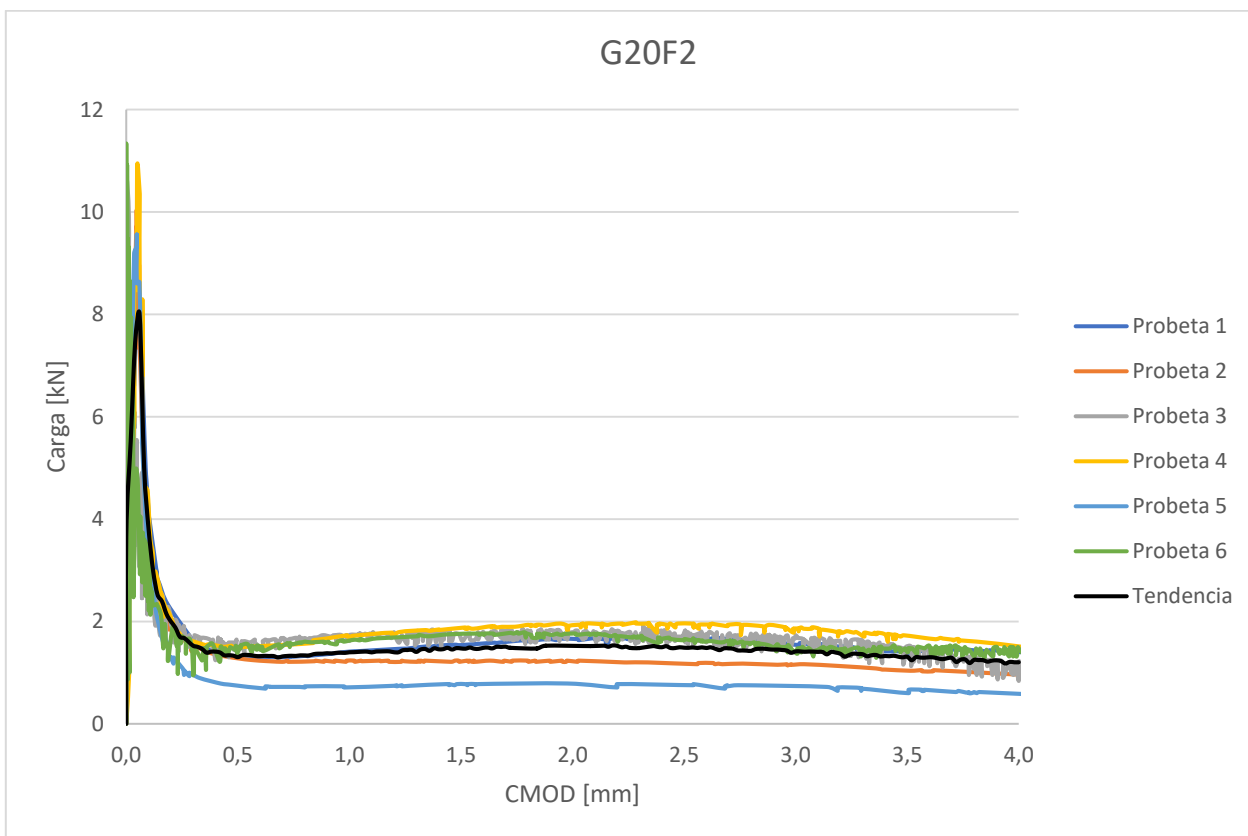


Figura 14: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 10: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G20F4	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,1135	2,33	3,66	1,00	0,87	0,96	0,91
2	0,0824	3,31	3,74	1,17	1,30	1,30	1,30
3	0,0942	2,37	3,30	1,17	1,11	1,27	1,37
4	0,0855	2,54	3,49	0,80	0,67	0,73	0,74
5	0,0118	3,52	3,52	0,75	0,75	0,75	0,75
6	0,0589	3,38	3,48	1,24	1,17	1,23	1,23
C.V.	48%	19%	4%	20%	26%	25%	27%

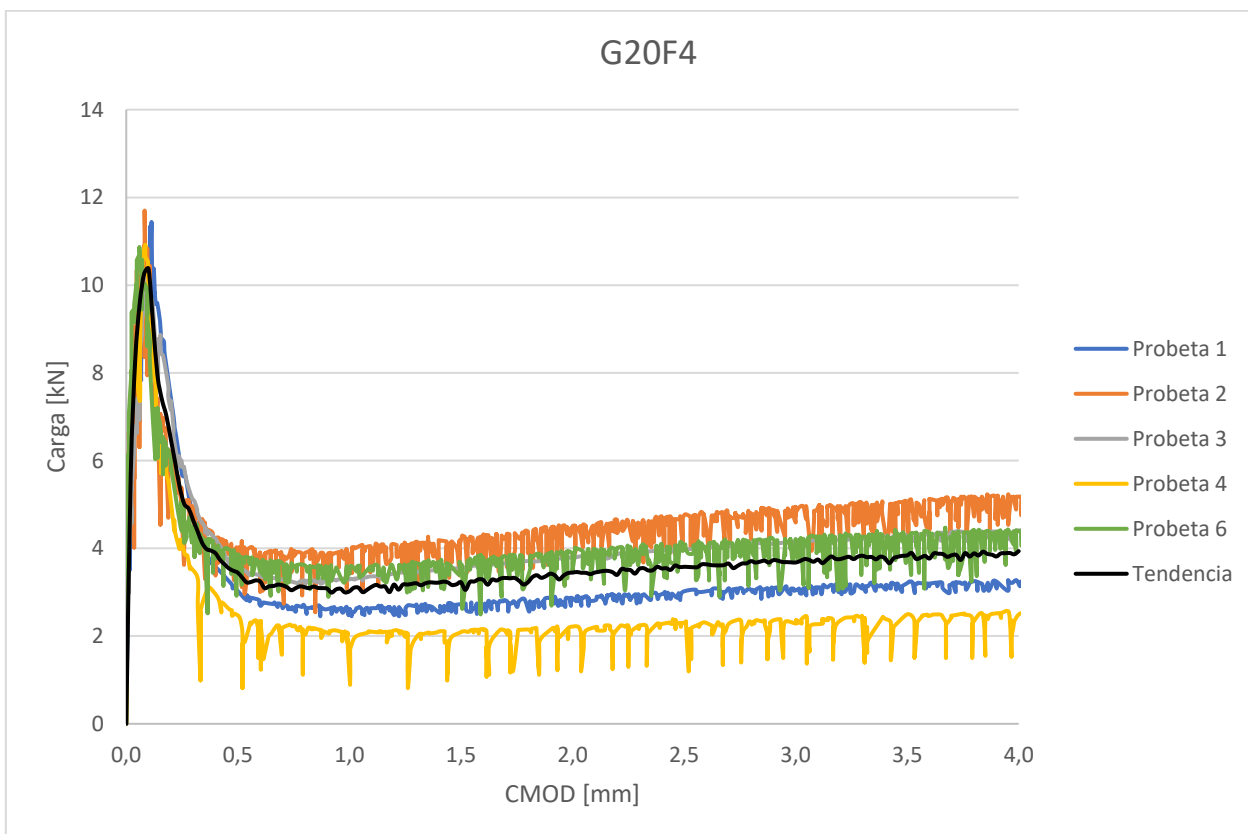


Figura 15: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 11: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G20F6	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,1115	1,35	2,61	0,91	1,05	1,16	1,17
2	0,0824	1,88	2,60	1,24	1,43	1,58	1,65
5	0,0706	2,44	2,92	0,84	0,75	0,75	0,75
6	0,0589	2,41	2,68	0,70	0,64	0,69	0,74
C.V.	28%	25%	6%	25%	37%	39%	40%

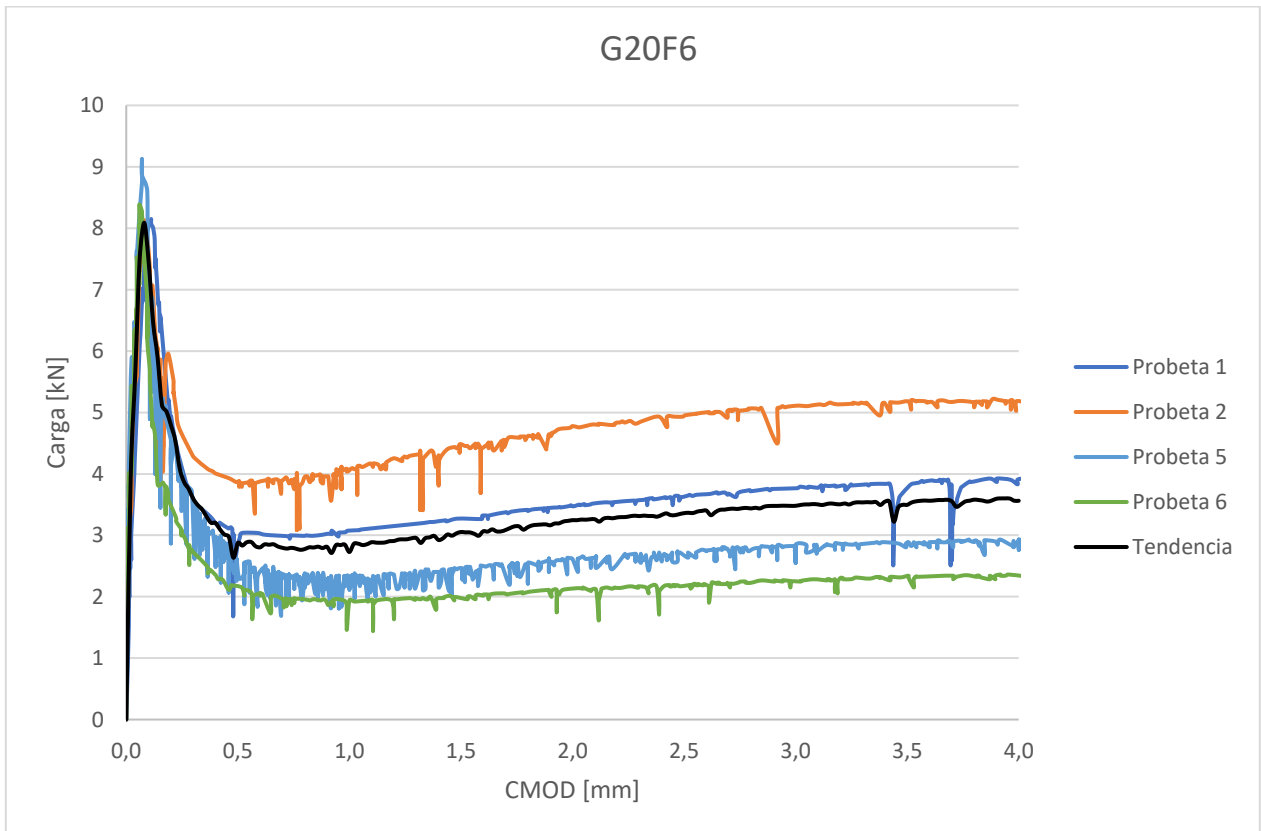


Figura 16: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 12: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G20 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G20F8	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0351	1,89	1,89	0,91	1,16	1,26	1,26
2	0,0396	2,44	2,44	1,30	1,67	1,63	1,26
3	0,0427	2,03	2,03	1,29	1,67	1,82	1,72
4	0,0363	2,16	2,16	0,94	1,23	1,31	1,30
5	0,0388	2,35	2,35	1,45	1,98	2,04	1,80
C.V.	8%	10%	10%	20%	22%	21%	18%

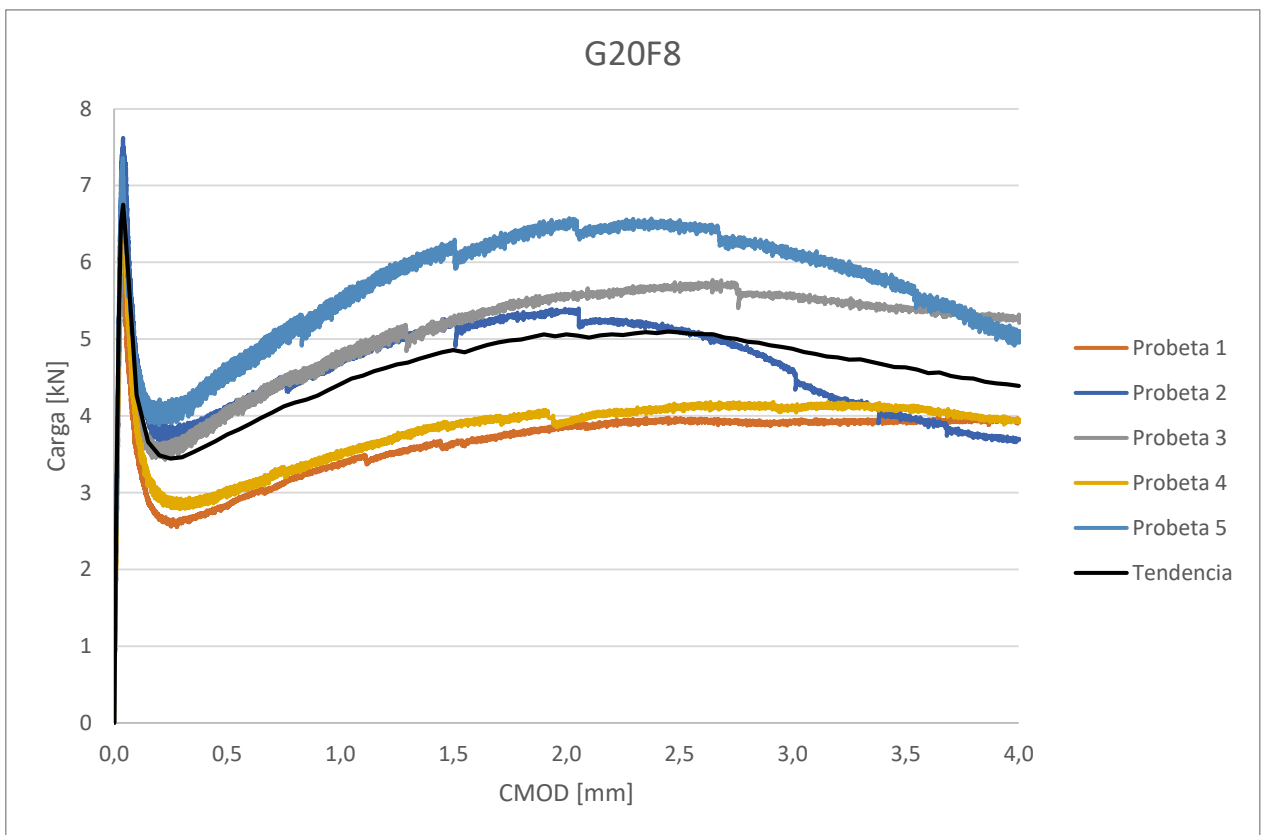


Figura 17: Curvas carga-deformación para el hormigón G20 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 13: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G30F0	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,1295	1,96	3,38	0,52	0,06	0,05	0,05
2	0,0824	2,56	3,23	0,65	0,06	0,01	0,00
3	0,1177	1,61	3,36	0,50	0,02	0,00	0,00
4	0,0824	2,62	3,30	0,30	0,03	0,03	0,03
5	0,1351	1,89	3,30	0,48	0,09	0,09	0,09
6	0,1318	1,82	3,49	0,72	0,11	0,07	0,07
C.V.	22%	20%	3%	28%	56%	84%	91%

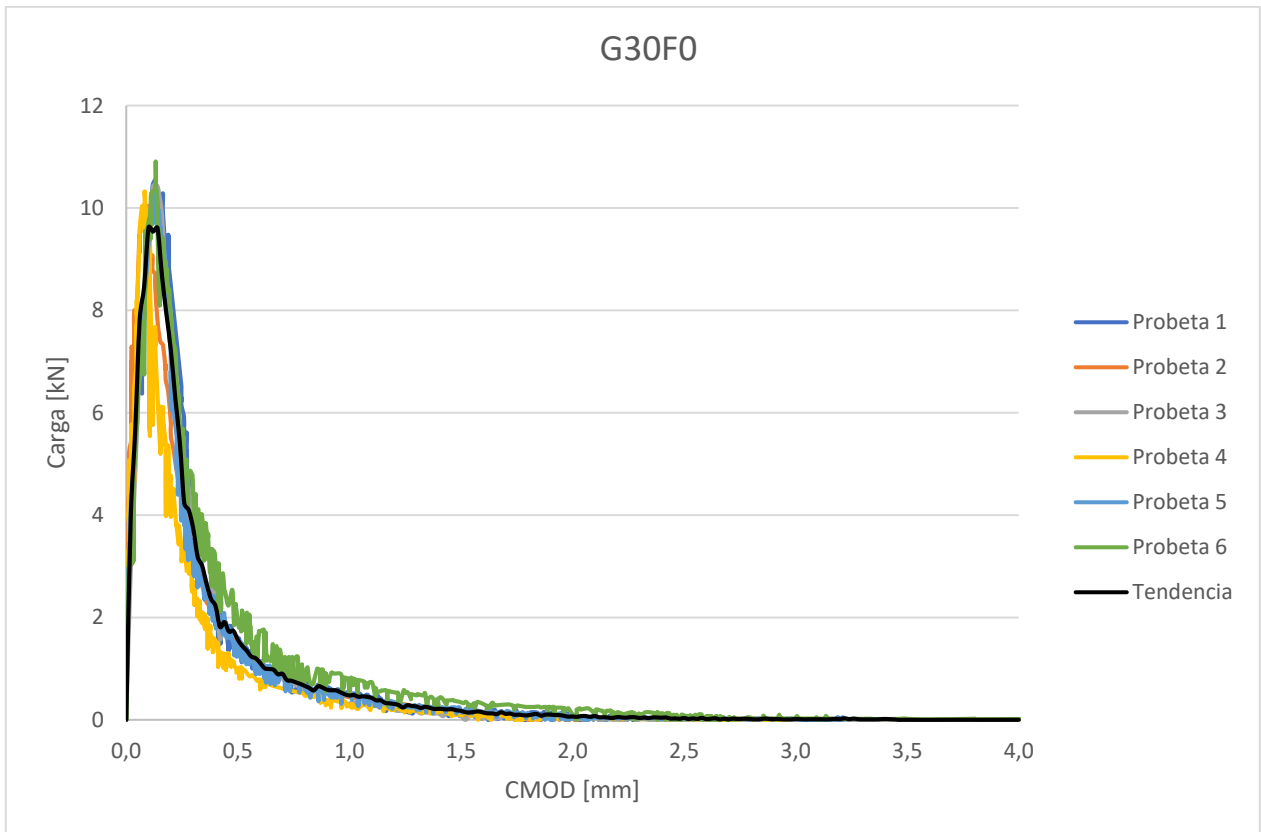


Figura 18: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 14: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G30F2	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0427	2,55	2,55	0,52	0,55	0,56	0,56
2	0,0441	3,36	3,36	0,60	0,65	0,65	0,65
3	0,0399	3,82	3,82	0,77	0,92	0,97	0,89
4	0,0701	2,75	3,01	0,65	0,59	0,64	0,62
5	0,0436	3,77	3,77	0,57	0,61	0,62	0,62
6	0,0488	3,67	3,67	0,45	0,51	0,49	0,47
C.V.	23%	16%	15%	18%	23%	25%	22%

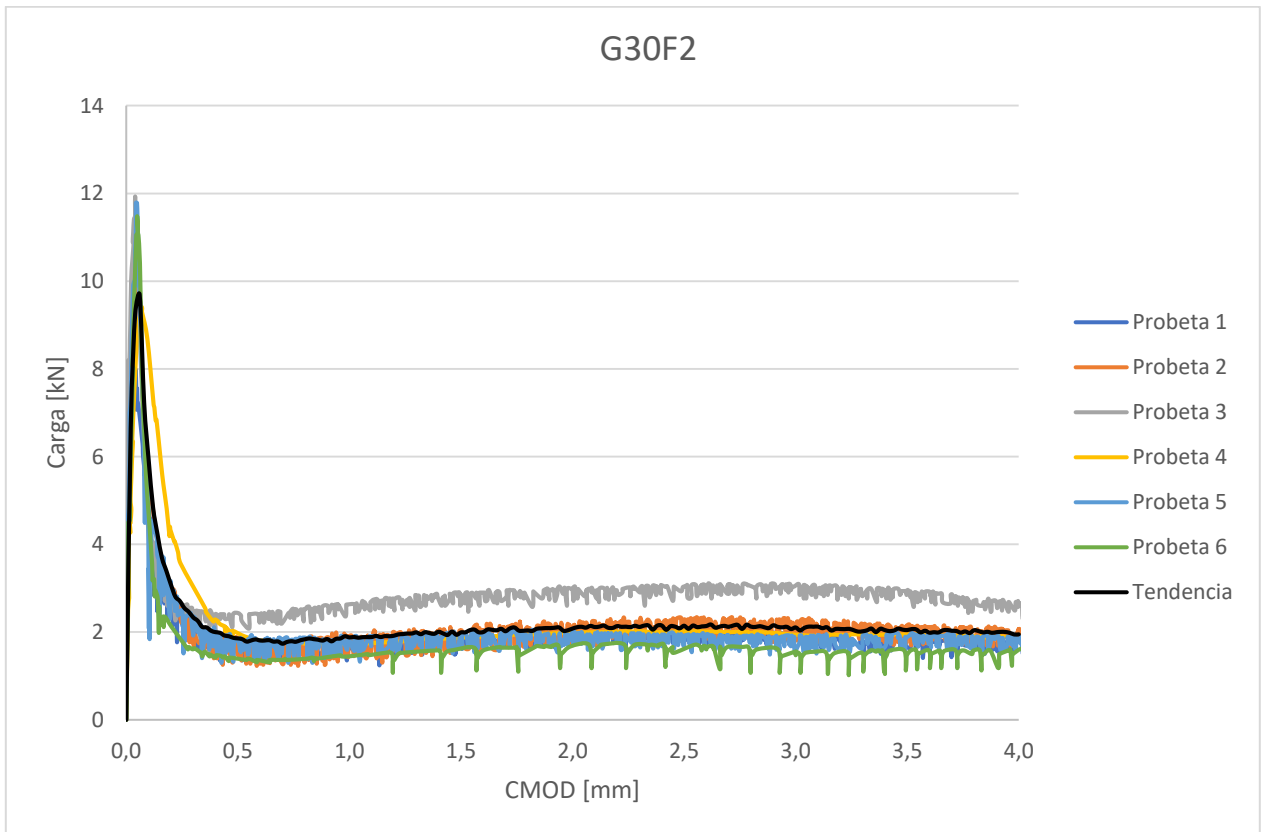


Figura 19: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 15: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G30F4	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	f _{PrimerPeak}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
1	0,1342	1,98	3,92	1,35	1,41	1,62	1,55
2	0,0217	4,03	4,03	1,03	0,99	1,01	1,01
3	0,1342	2,19	3,82	1,02	0,82	0,82	0,82
4	0,0277	3,93	3,93	1,09	0,92	0,94	0,94
5	0,1028	2,50	3,82	1,40	1,18	1,36	1,38
6	0,1071	1,72	4,39	1,07	0,73	0,73	0,75
C.V.	58%	37%	5%	15%	25%	32%	30%

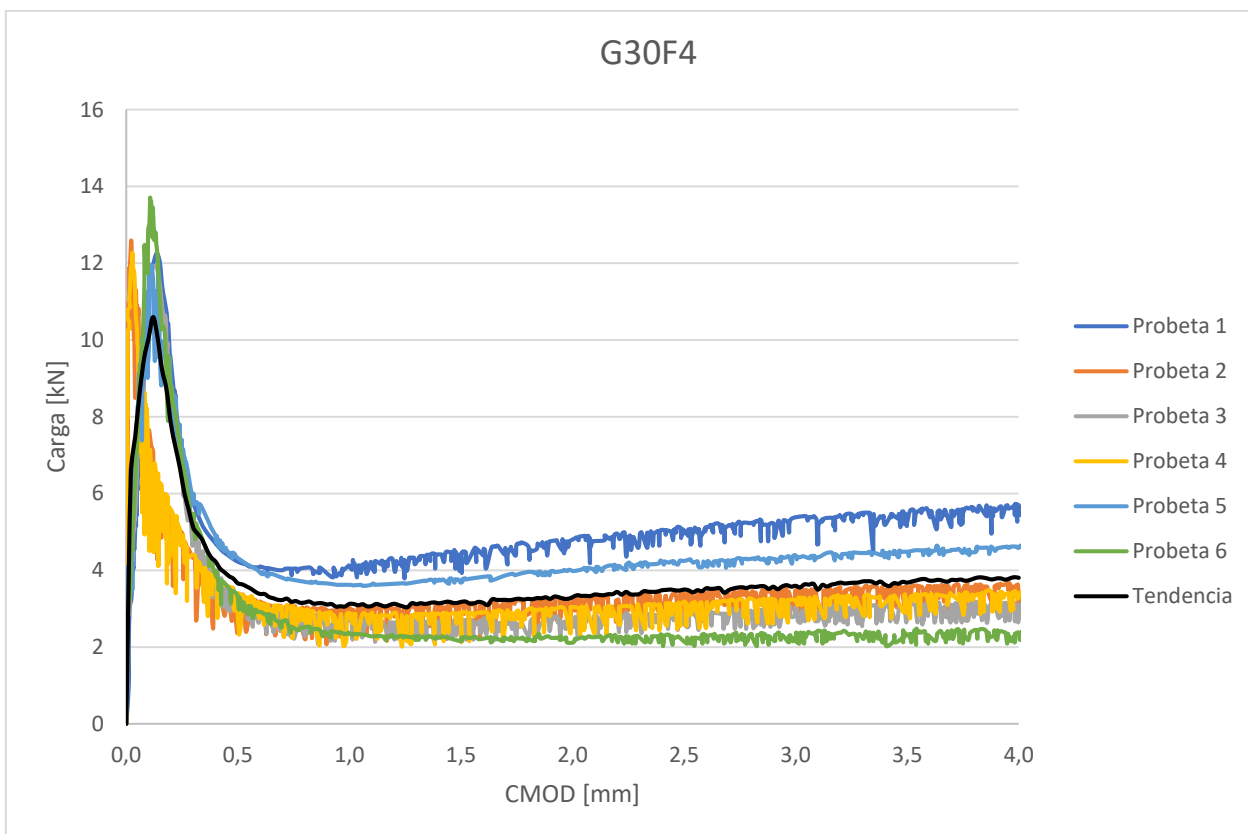


Figura 20: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 16: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G30F6	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,1237	2,09	3,78	1,30	1,52	1,52	1,52
2	0,1198	1,62	3,20	0,95	0,77	0,83	0,84
3	0,1295	1,61	3,80	1,94	2,30	2,57	2,79
4	0,1357	2,22	3,85	1,63	1,61	1,83	1,98
5	0,1222	1,98	3,66	1,68	1,53	1,62	1,73
6	0,1254	1,49	3,87	1,55	1,35	1,58	1,76
C.V.	5%	16%	7%	23%	32%	34%	36%

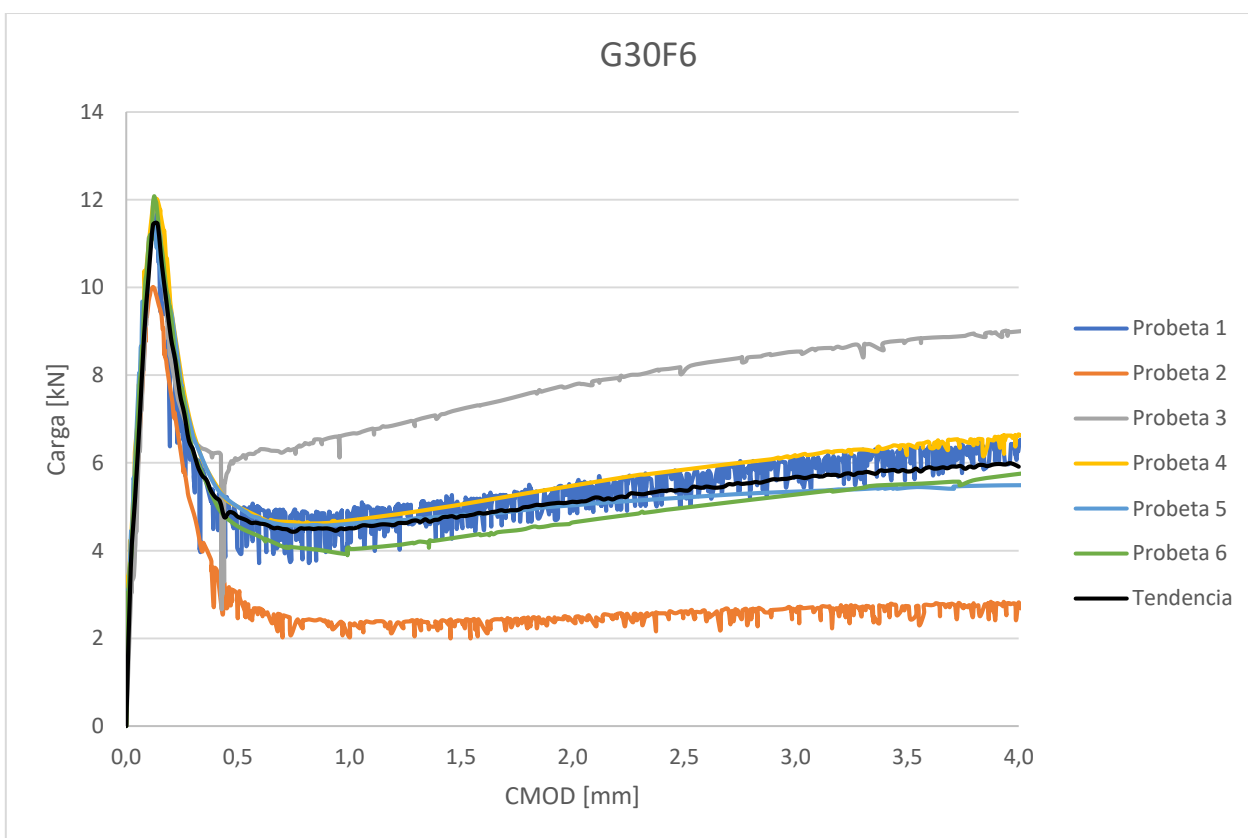


Figura 21: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 17: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G30 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G30F8	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
3	0,0422	3,27	3,27	2,14	2,92	3,18	3,07
5	0,0441	3,43	3,43	2,36	3,31	3,64	3,46
6	0,0436	3,39	3,39	2,10	2,97	3,36	3,36
C.V.	2%	2%	2%	6%	7%	7%	6%

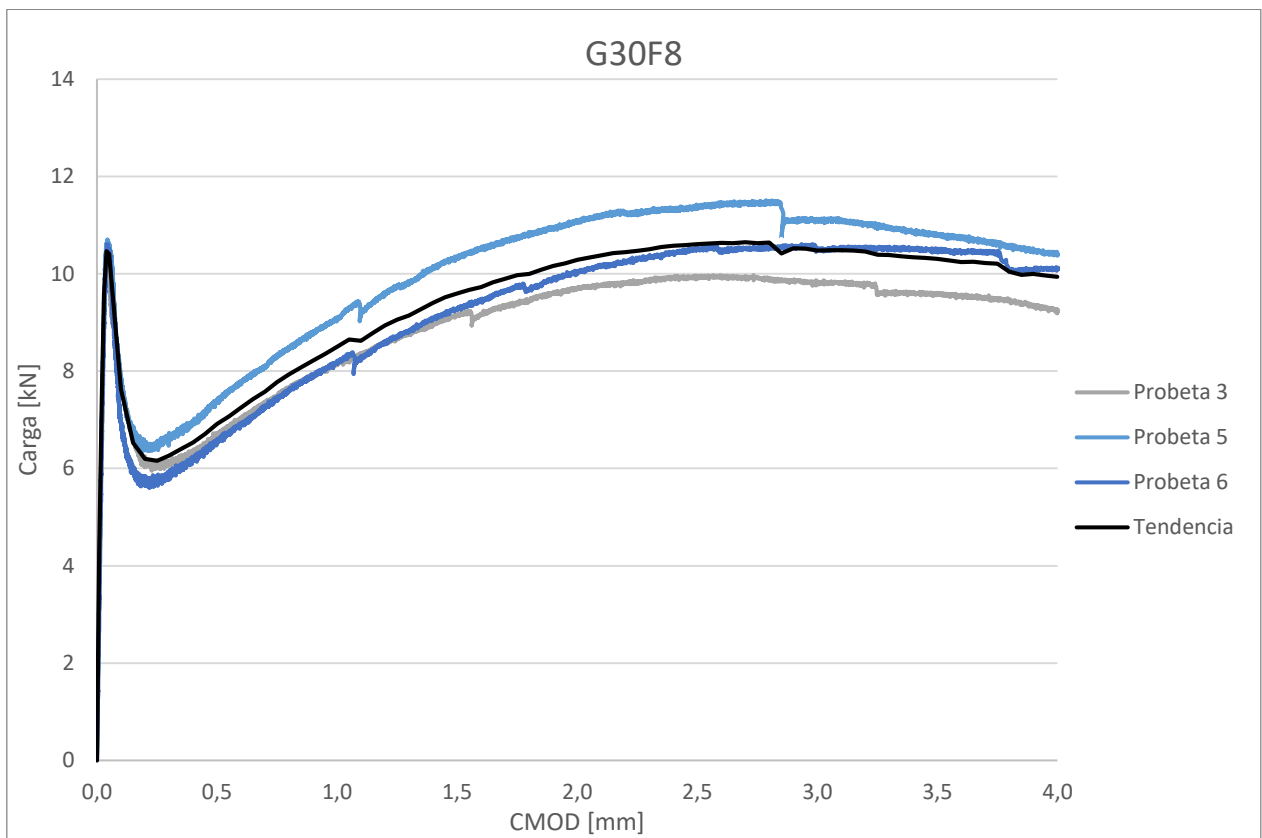


Figura 22: Curvas carga-deformación para el hormigón G30 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 18: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G40F0	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0521	5,12	5,19	0,12	0,00	0,00	0,00
2	0,0386	4,78	4,78	0,05	0,00	0,00	0,00
3	0,1040	2,47	4,51	0,17	0,00	0,00	0,00
4	0,0303	4,59	4,59	0,02	0,00	0,00	0,00
5	0,0695	3,89	5,03	0,20	0,00	0,00	0,00
6	0,0354	4,75	4,75	0,07	0,00	0,00	0,00
C.V.	51%	23%	5%	68%	-	-	-

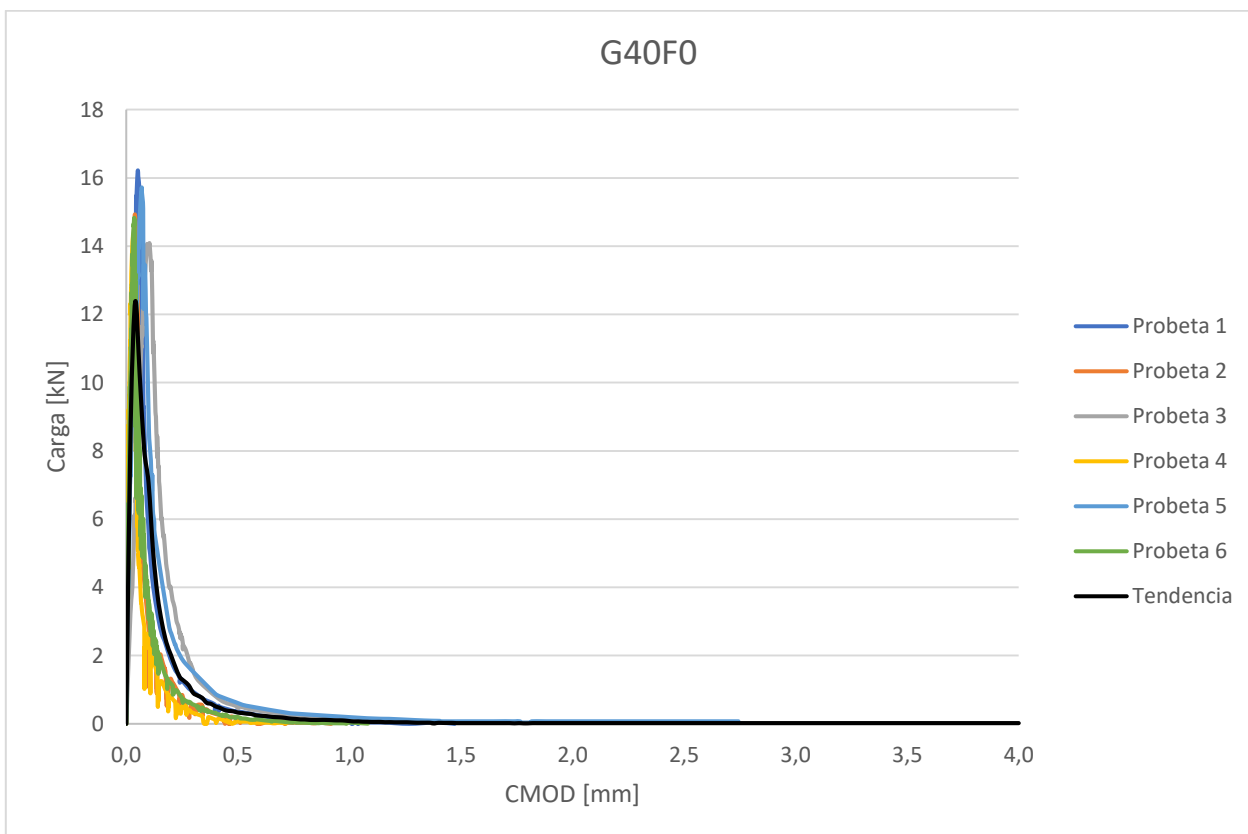


Figura 23: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 19: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G40F2	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0541	2,97	3,00	1,05	1,04	1,15	1,11
2	0,0867	2,99	3,55	0,86	0,69	0,69	0,68
3	0,0681	3,35	3,56	1,05	0,91	0,98	0,96
4	0,0414	3,30	3,30	0,62	0,56	0,58	0,57
5	0,0879	2,96	3,29	1,07	0,96	1,04	1,06
6	0,0541	2,72	2,91	0,80	0,86	0,90	0,90
C.V.	29%	8%	8%	20%	21%	24%	24%

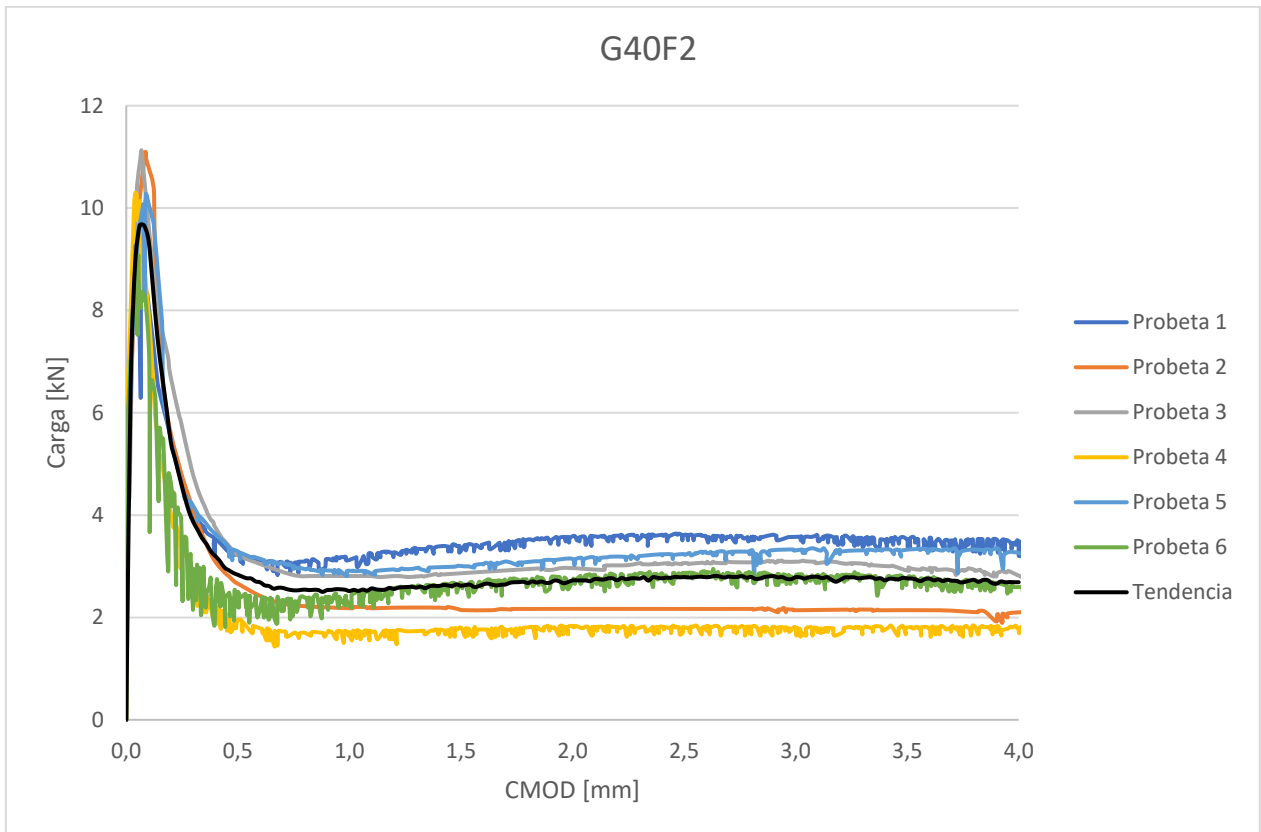


Figura 24: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 20: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G40F4	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0543	3,87	3,94	0,83	1,00	1,13	1,14
2	0,0618	4,04	4,39	1,21	1,61	1,77	1,64
3	0,0504	4,45	4,62	1,09	1,36	1,46	1,46
4	0,0396	4,86	4,86	1,11	1,37	1,53	1,51
6	0,0433	4,55	4,55	1,31	1,85	1,87	
C.V.	18%	9%	8%	16%	18%	18%	17%

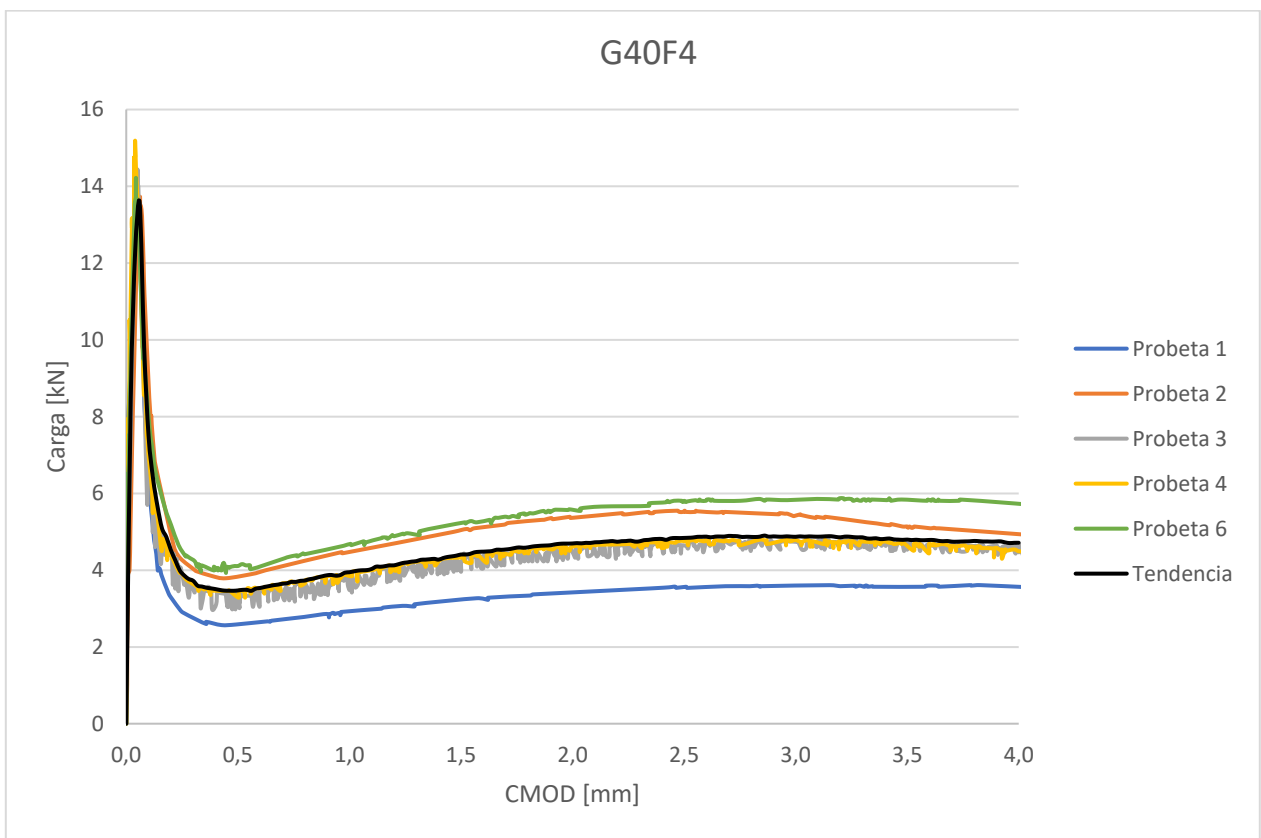


Figura 25: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 21: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G40F6	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0431	4,32	4,32	1,57	1,96	2,24	2,27
3	0,0406	4,18	4,18	2,41	3,28	3,65	3,71
4	0,0380	4,07	4,07	1,23	1,49	1,66	1,66
5	0,0421	3,88	3,88	1,41	1,86	2,04	2,13
6	0,0421	3,88	3,88	1,63	2,20	2,46	2,48
C.V.	5%	5%	5%	27%	31%	31%	31%

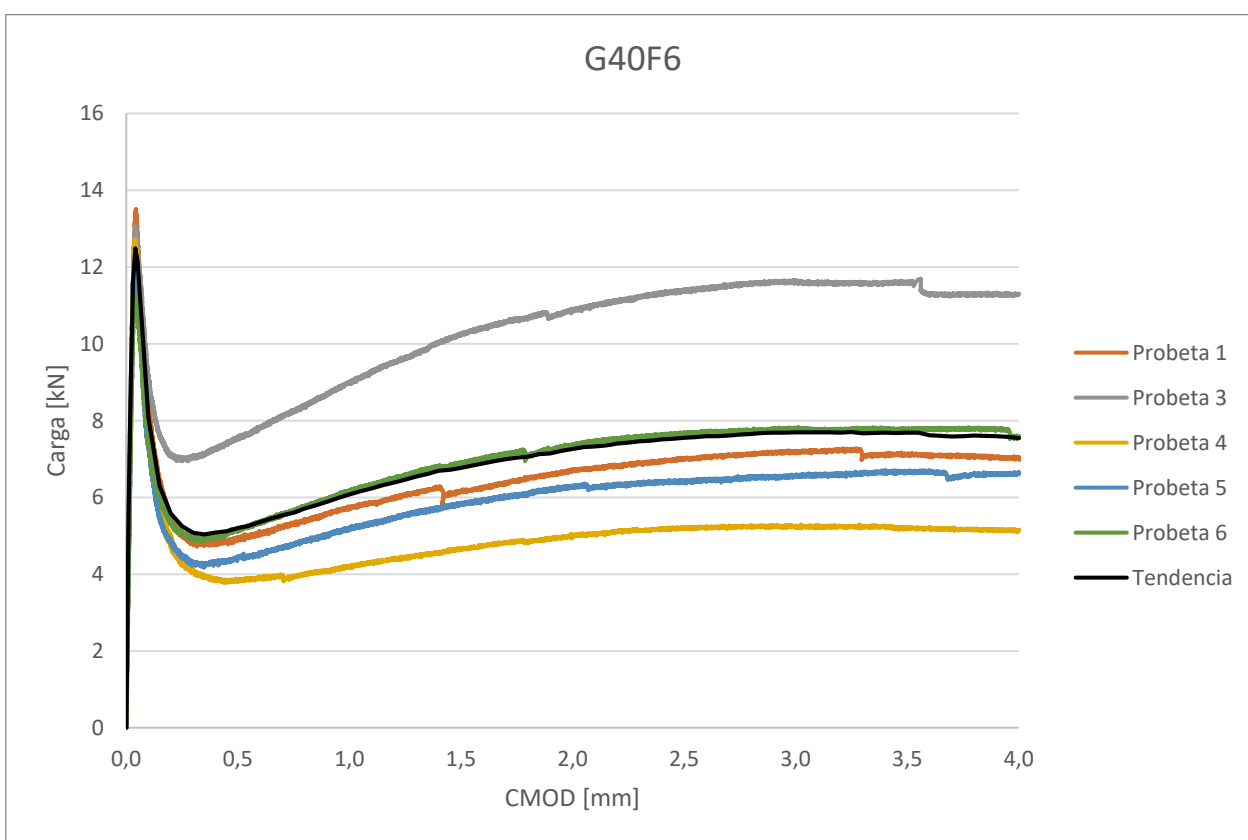


Figura 26: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 22: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G40 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G40F8	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0467	4,17	4,17	2,35	3,26	3,64	3,70
2	0,0466	4,15	4,15	1,59	2,14	2,43	2,44
3	0,0390	3,87	3,87	1,54	2,19	2,52	2,65
4	0,0444	3,78	3,78	2,05	3,05	3,51	3,46
5	0,0529	3,25	3,31	2,40	2,94	3,35	3,36
6	0,0374	3,36	3,36	1,12	1,46	1,65	1,75
C.V.	13%	10%	10%	28%	27%	27%	26%

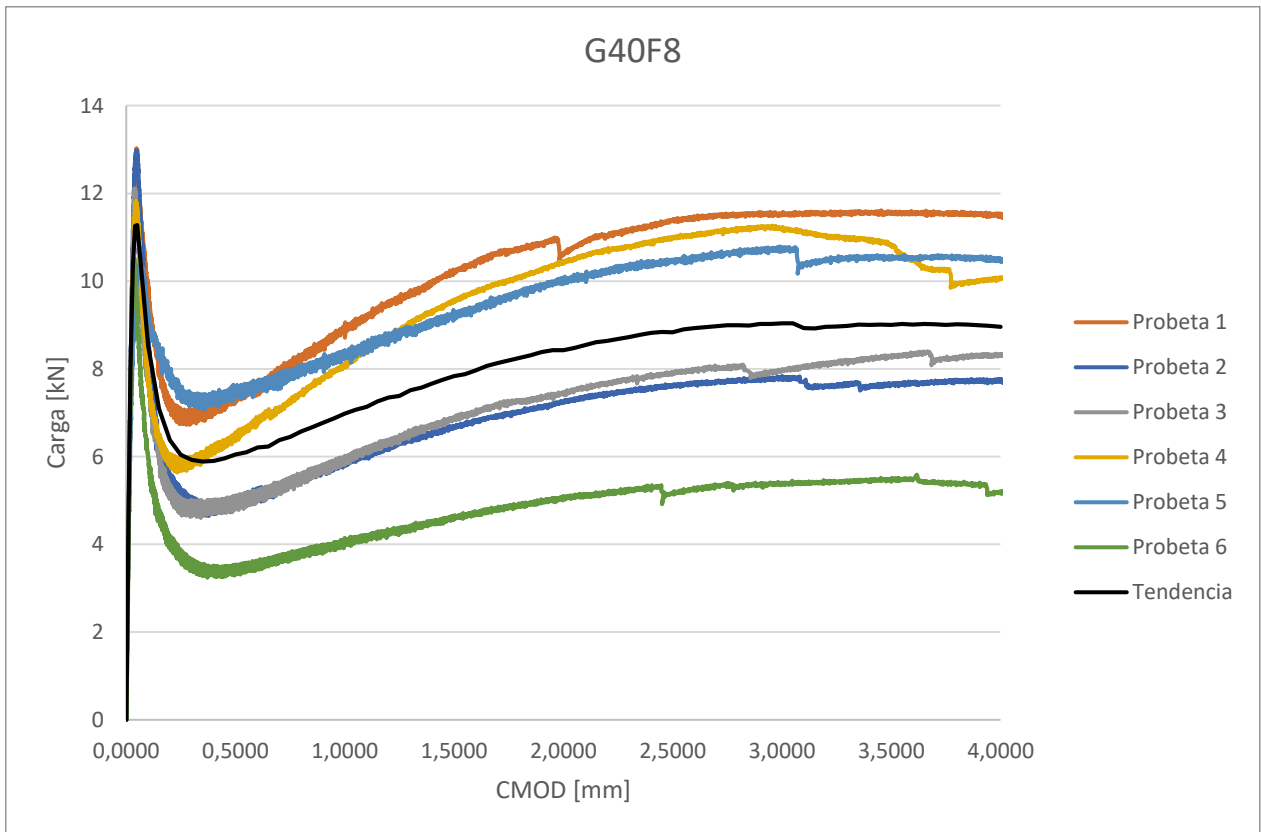


Figura 27: Curvas carga-deformación para el hormigón G40 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 23: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G50F0	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0665	5,56	6,45	0,16	0,00	0,00	0,00
2	0,0641	5,38	6,12	0,11	0,00	0,00	0,00
3	0,0619	5,05	6,00	0,19	0,00	0,00	0,00
4	0,0567	5,59	6,15	0,13	0,00	0,00	0,00
5	0,0647	4,28	6,25	0,16	0,00	0,00	0,00
6	0,0608	5,10	5,71	0,23	0,00	0,00	0,00
C.V.	6%	9%	4%	26%	-	-	-

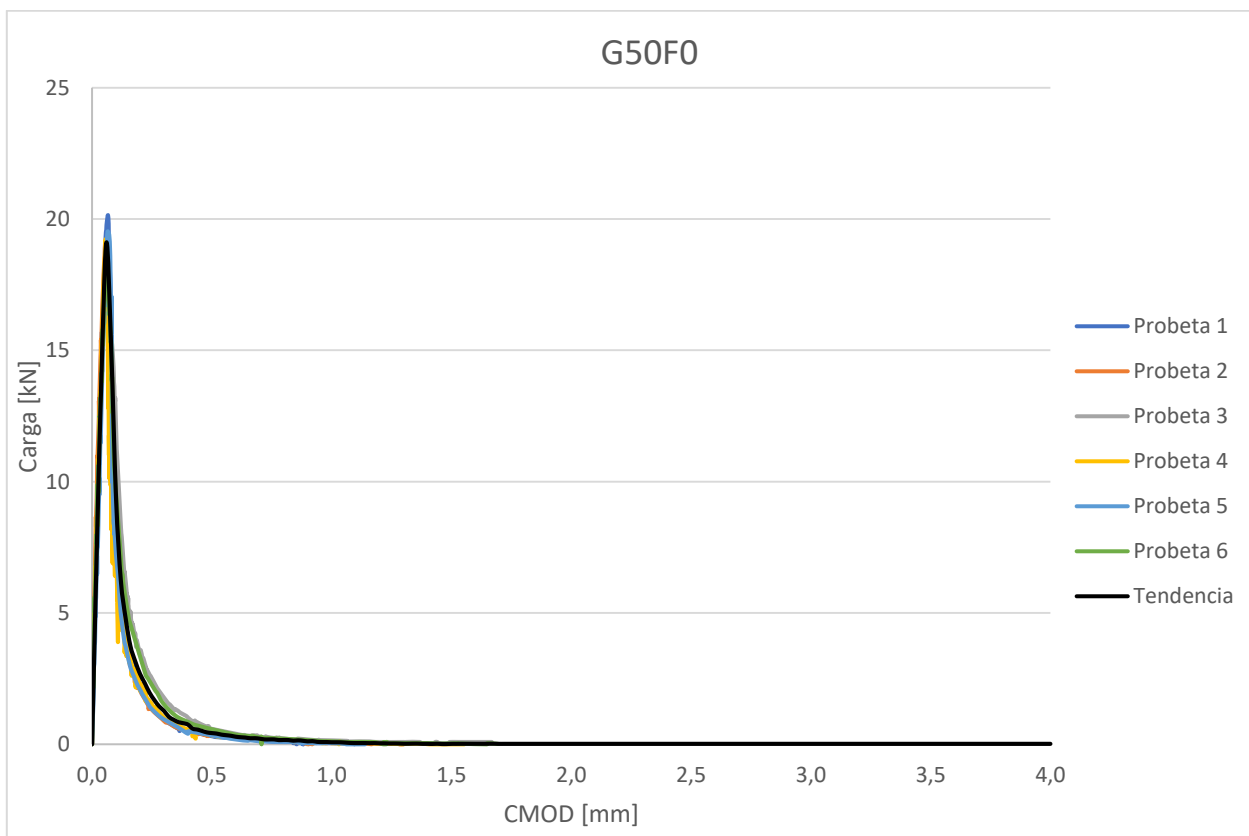


Figura 28: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 24: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G50F2	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0360	5,99	5,99	0,61	0,68	0,79	0,81
2	0,0681	4,07	6,06	0,50	0,47	0,53	0,53
3	0,0612	3,70	5,57	0,76	0,88	0,97	0,97
4	0,0554	5,13	6,25	0,57	0,73	0,82	0,81
5	0,0148	5,90	5,90	0,59	0,66	0,67	0,67
6	0,0032	6,47	6,47	0,83	1,01	1,09	0,98
C.V.	66%	21%	5%	19%	25%	25%	22%

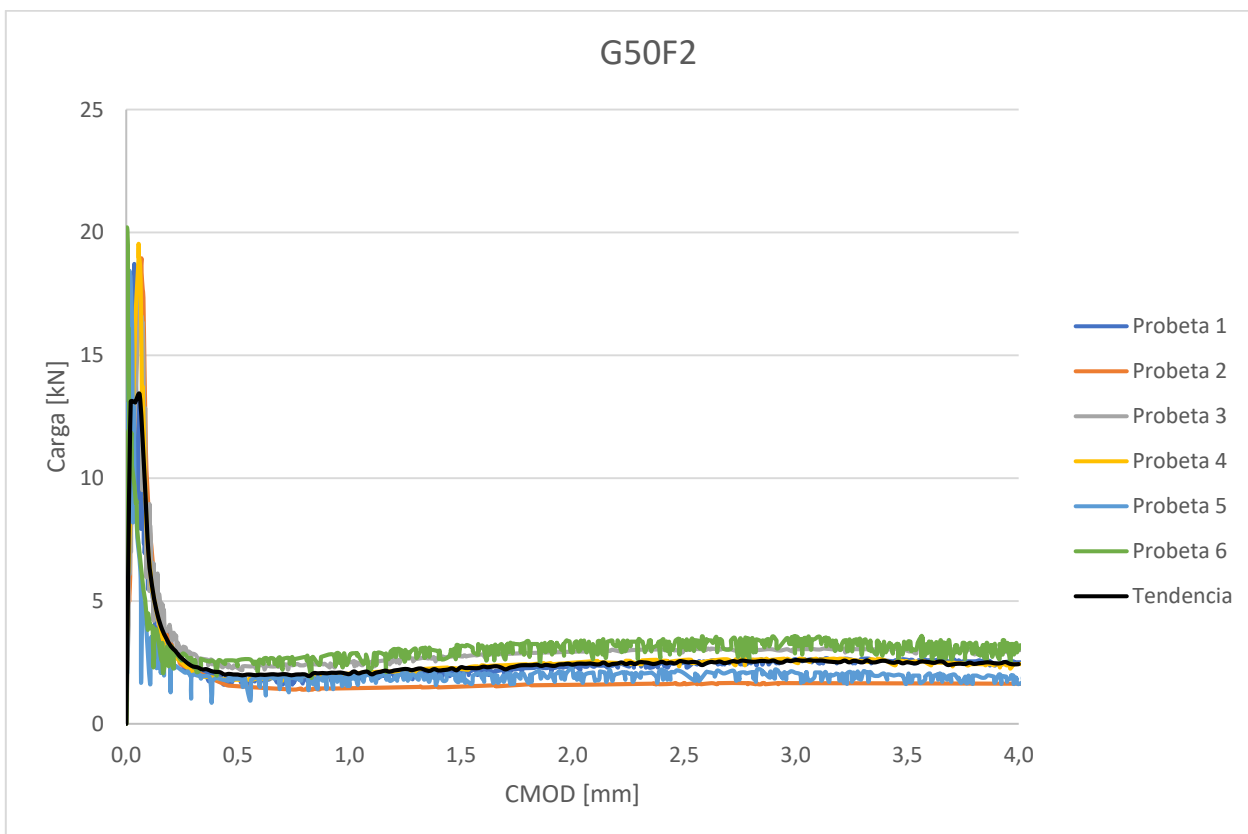


Figura 29: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 25: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G50F4	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,1379	4,00	6,63	1,08	0,93	0,93	0,93
2	0,0506	6,41	6,48	1,32	1,05	1,21	1,36
3	0,0611	5,12	6,04	1,21	1,09	1,10	1,10
4	0,1959	0,98	5,72	1,72	0,97	1,05	1,12
5	0,1617	2,80	6,62	1,66	1,21	1,37	1,46
6	0,1804	2,54	6,20	1,43	1,02	1,08	1,16
C.V.	47%	54%	6%	18%	10%	13%	16%

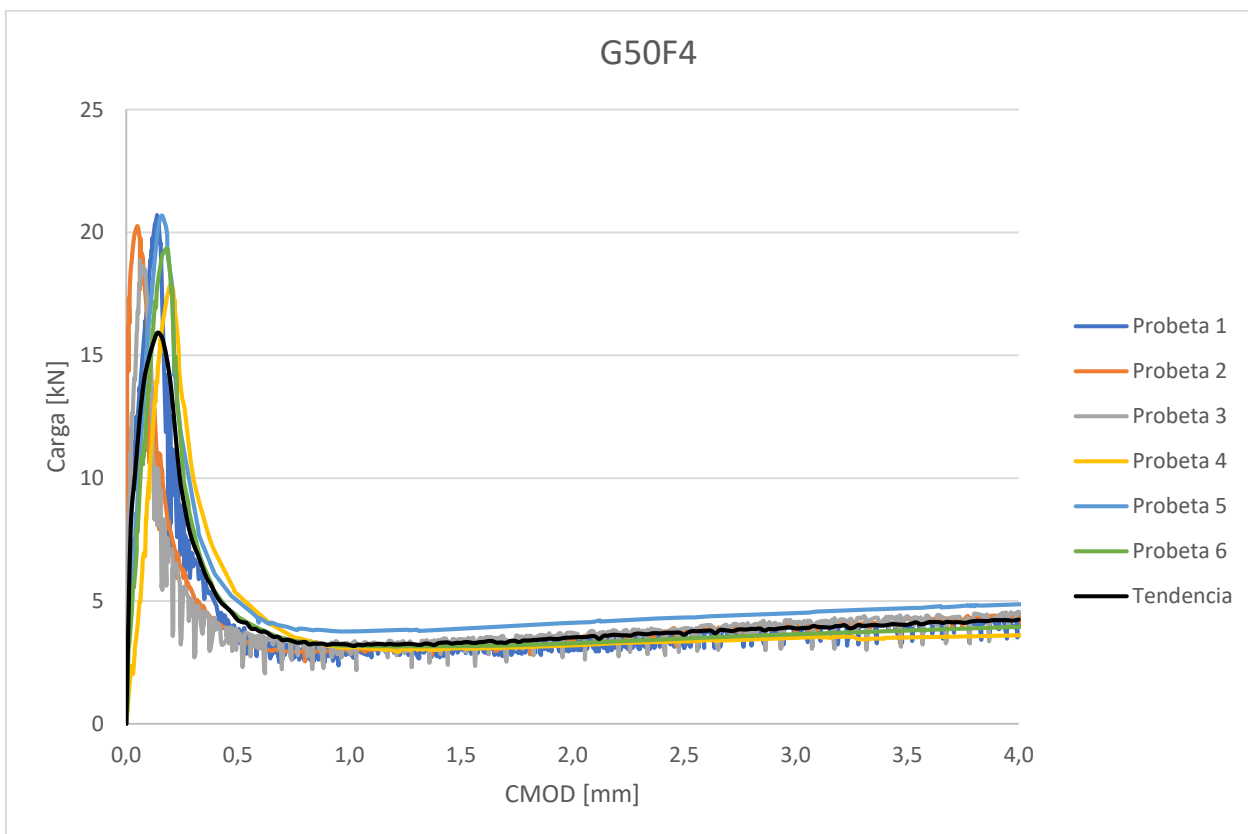


Figura 30: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 26: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G50F6	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
2	0,0496	4,92	4,92	1,88	2,59	3,03	3,12
3	0,0463	5,46	5,46	1,78	2,30	2,55	2,54
4	0,0462	5,12	5,12	1,54	1,96	2,31	2,55
5	0,0427	4,59	4,59	1,90	2,53	3,03	3,26
C.V.	6%	7%	7%	9%	12%	13%	13%

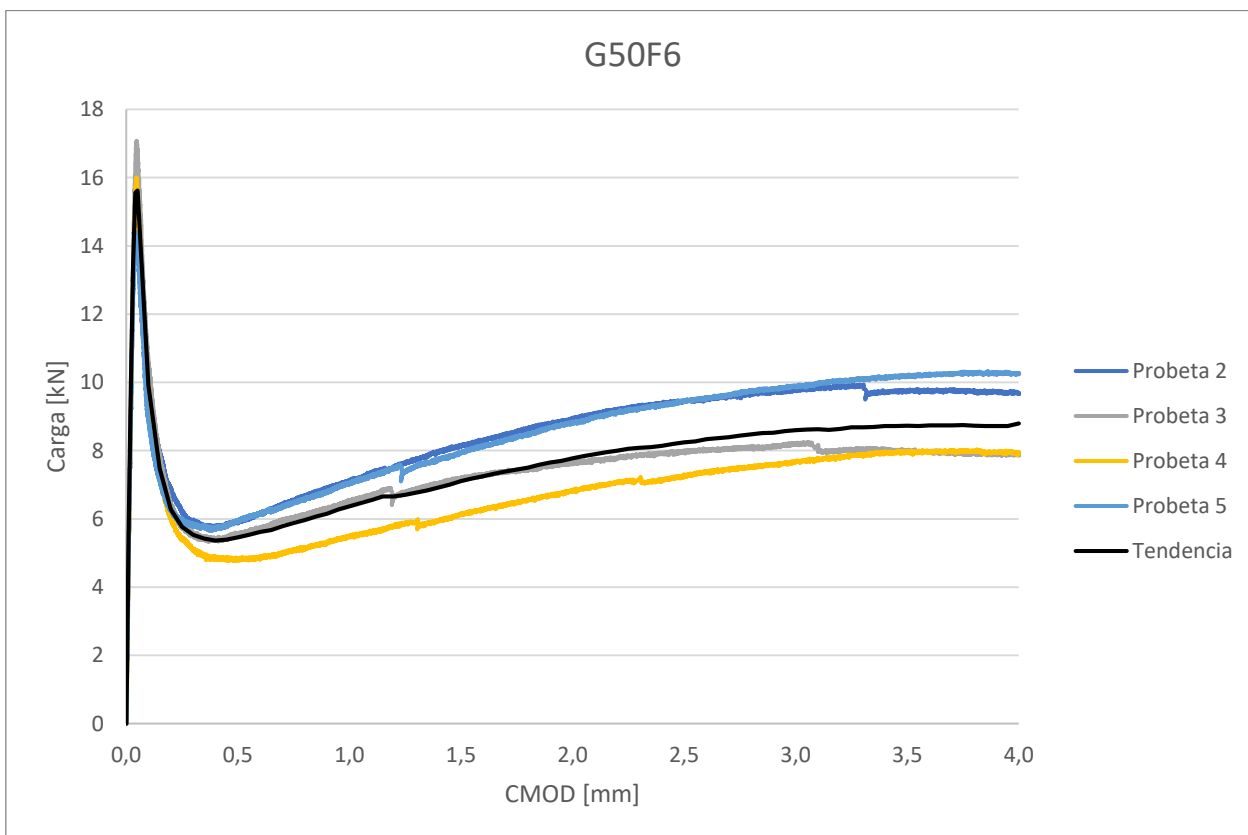


Figura 31: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 27: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G50 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G50F8	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0463	5,02	5,02	1,85	2,59	2,97	3,08
2	0,0509	5,02	5,05	1,85	2,68	3,18	3,45
3	0,0515	5,46	5,48	2,67	3,72	4,25	4,37
4	0,0474	5,41	5,41	2,52	3,67	4,24	4,31
5	0,0495	4,65	4,65	2,24	3,04	3,56	3,73
6	0,0448	5,28	5,28	2,81	4,24	4,92	5,11
C.V.	6%	6%	6%	18%	20%	19%	18%

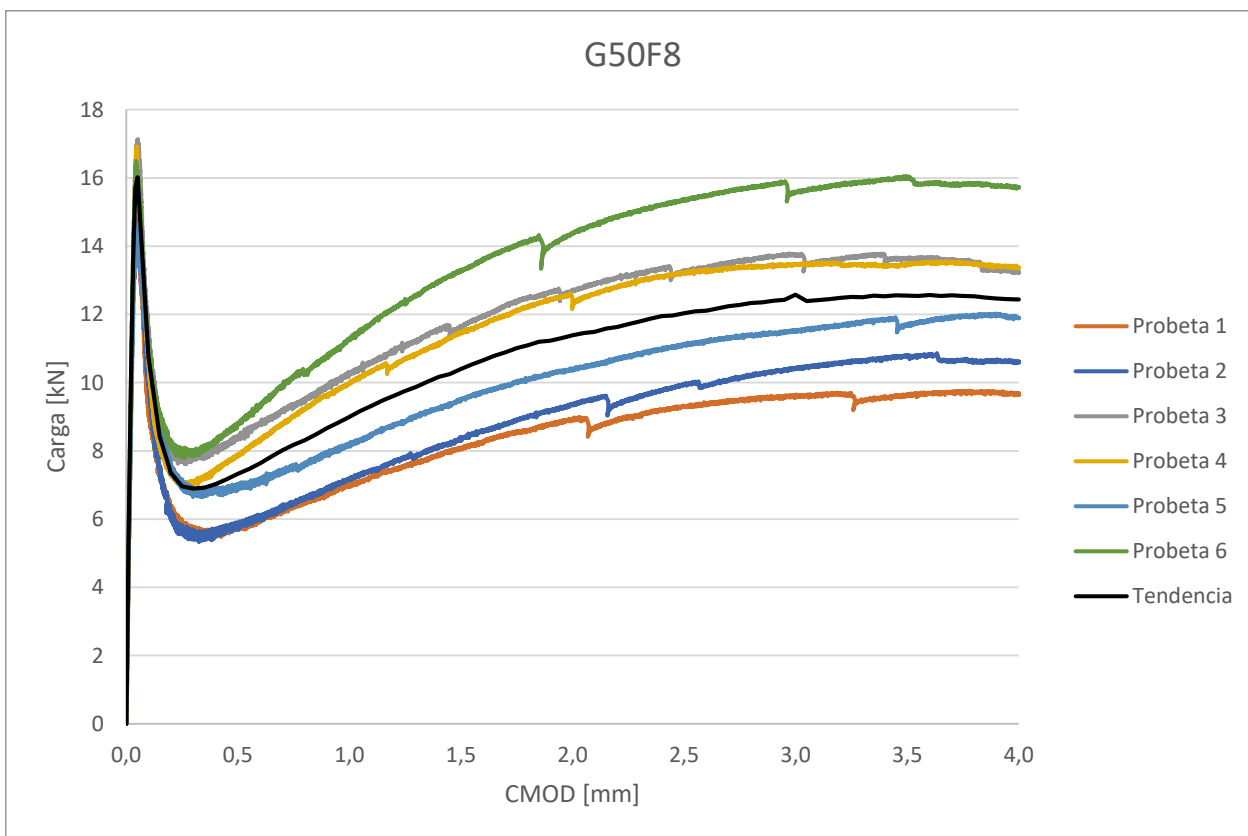


Figura 32: Curvas carga-deformación para el hormigón G50 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 28: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G60F0	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0328	6,26	6,26	0,16	0,00	0,00	0,00
2	0,0510	6,46	6,59	0,17	0,00	0,00	0,00
3	0,0451	6,13	6,13	0,16	0,00	0,00	0,00
4	0,0707	4,79	5,80	0,28	0,00	0,00	0,00
5	0,0494	5,77	5,77	0,24	0,00	0,00	0,00
6	0,0635	5,37	6,05	0,15	0,00	0,00	0,00
C.V.	26%	11%	5%	27%	-	-	-

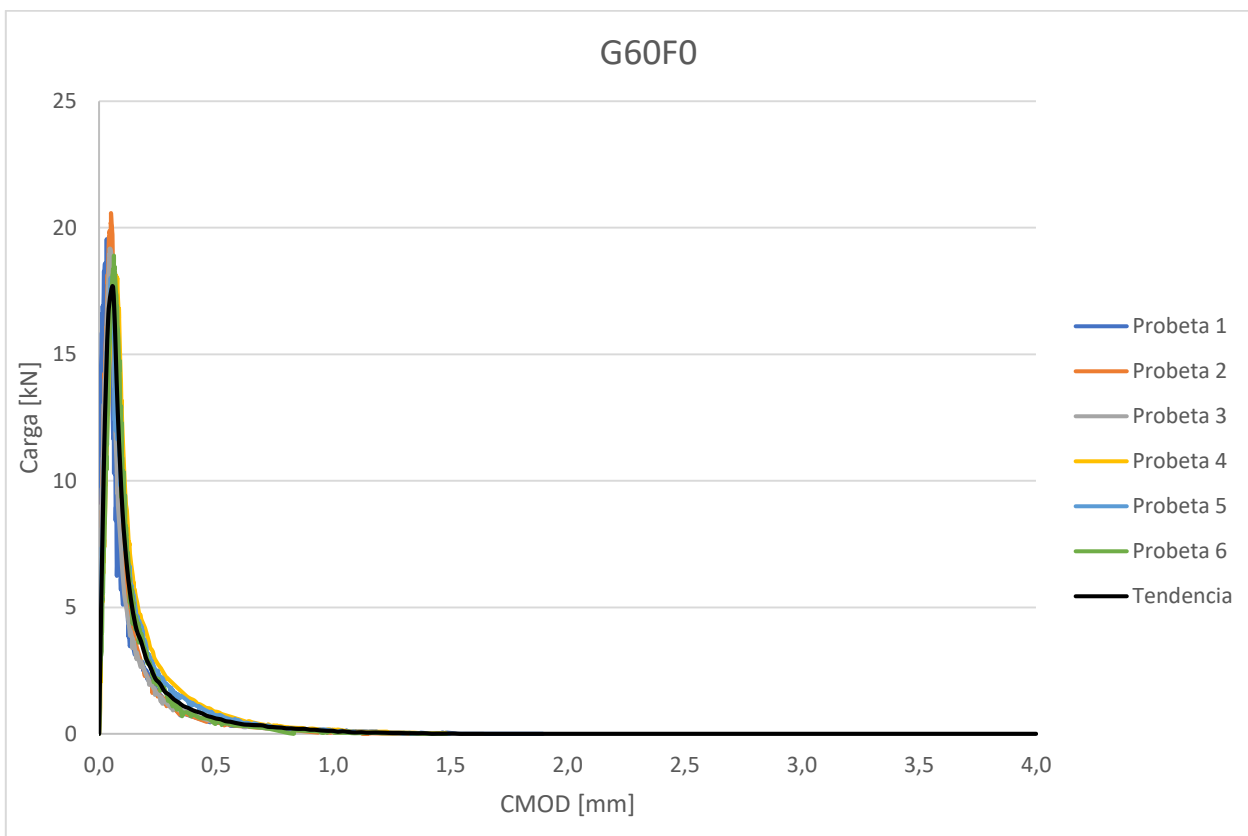


Figura 33: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 0 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 29: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G60F2	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
2	0,0504	6,24	6,40	0,64	0,74	0,80	0,67
3	0,0540	5,86	6,38	0,81	1,00	1,14	1,14
4	0,0608	5,32	6,34	0,64	0,78	0,88	0,84
5	0,0361	6,42	6,42	0,88	1,00	1,00	1,00
6	0,0587	5,11	6,45	0,67	0,78	0,86	0,84
C.V.	19%	10%	1%	15%	15%	14%	20%

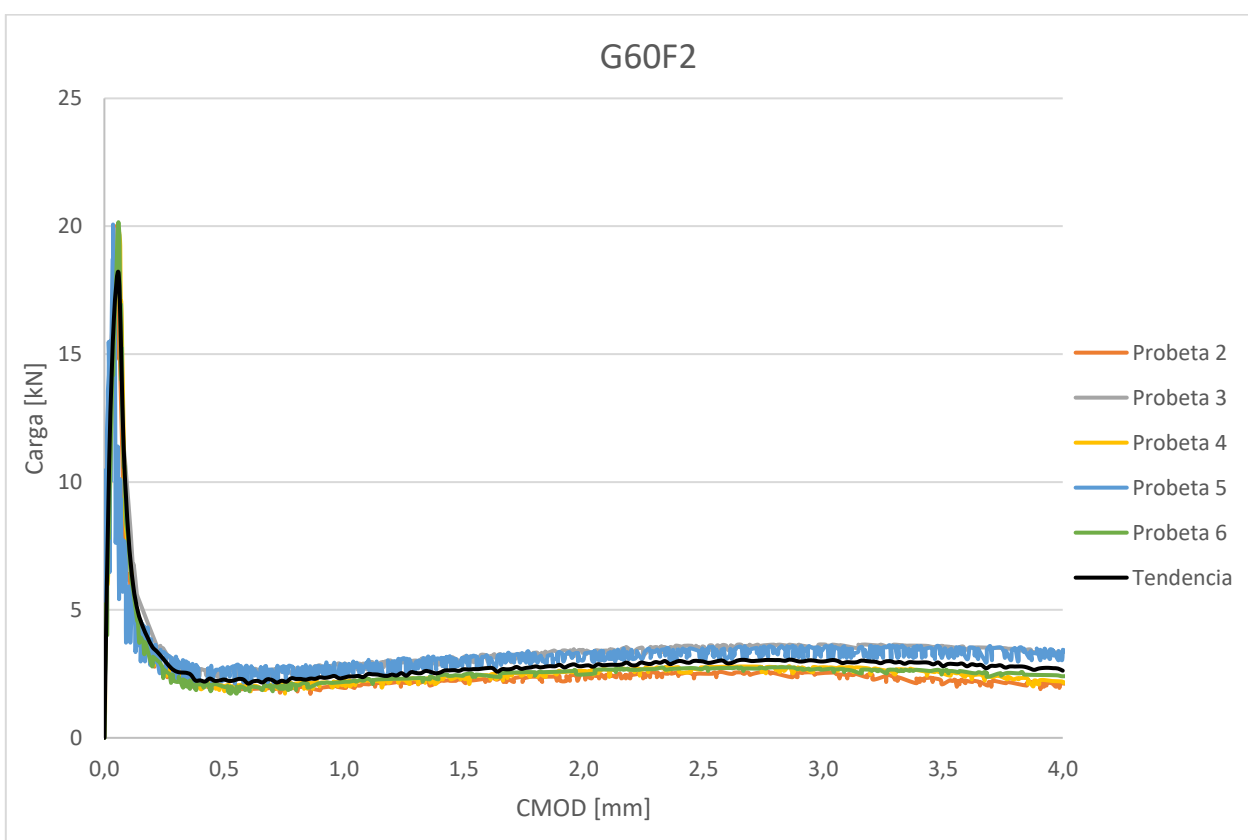


Figura 34: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 2 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 30: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G60F4	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,1672	2,42	7,22	1,35	0,96	1,09	1,21
2	0,1818	2,10	7,34	1,59	1,31	1,48	1,60
3	0,1713	2,74	7,36	2,30	1,72	1,98	2,18
4	0,1789	1,72	6,82	1,77	1,30	1,50	1,67
5	0,1801	2,30	8,01	1,98	1,32	1,51	1,67
6	0,1269	4,06	7,23	1,37	1,06	1,19	1,24
C.V.	12%	32%	5%	21%	21%	21%	22%

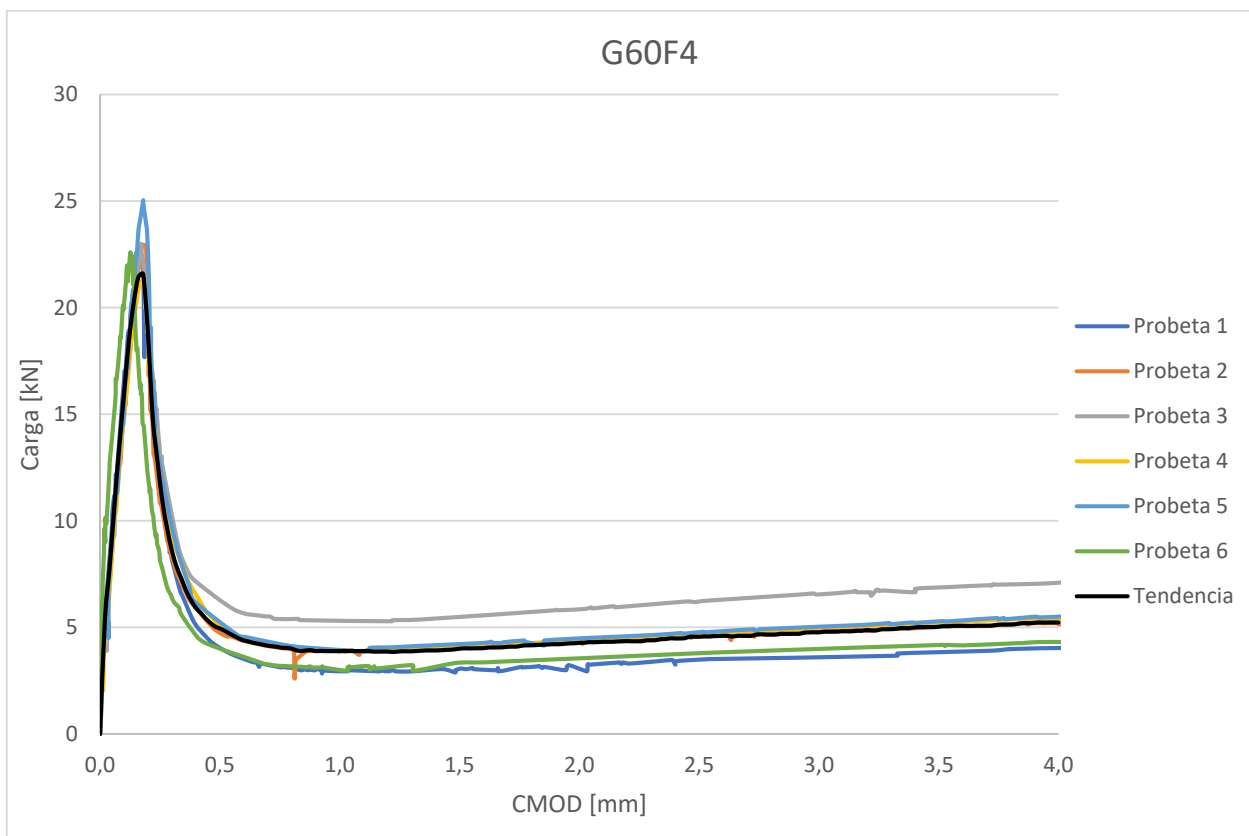


Figura 35: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 4 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 31: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G60F6	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0483	4,17	4,17	1,61	1,91	2,16	2,23
2	0,0546	4,25	4,29	1,52	1,90	2,23	2,30
3	0,0465	6,55	5,23	1,97	2,60	3,00	3,11
4	0,0402	6,14	5,00	1,69	2,05	2,29	2,39
5	0,0420	5,51	4,63	1,93	2,57	2,92	3,01
6	0,0483	5,26	5,26	1,90	2,39	2,68	2,74
C.V.	11%	18%	10%	11%	14%	14%	14%

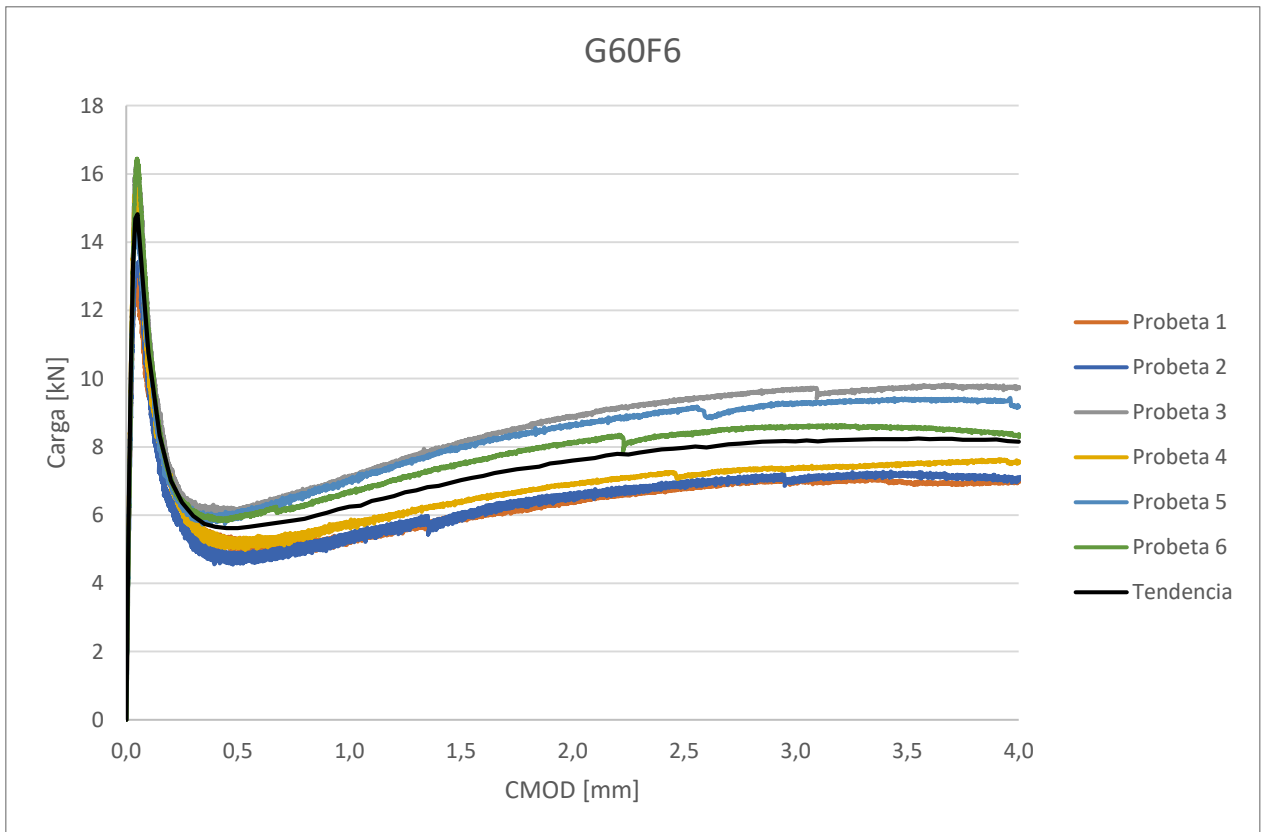


Figura 36: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 6 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Tabla 32: Resultados de resistencia a flexión para el hormigón G60 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

G60F8	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	0,0452	5,76	5,76	2,79	4,01	4,71	4,78
2	0,0626	6,23	5,32	2,64	3,61	4,23	4,22
3	0,0374	5,01	5,01	2,23	2,99	3,48	3,55
4	0,0537	5,88	4,95	2,81	3,95	4,57	4,70
5	0,0904	5,30	5,30	3,46	5,03	5,94	6,44
6	0,0572	6,56	5,67	3,88	5,57	6,48	6,39
C.V.	32%	10%	6%	20%	23%	23%	23%

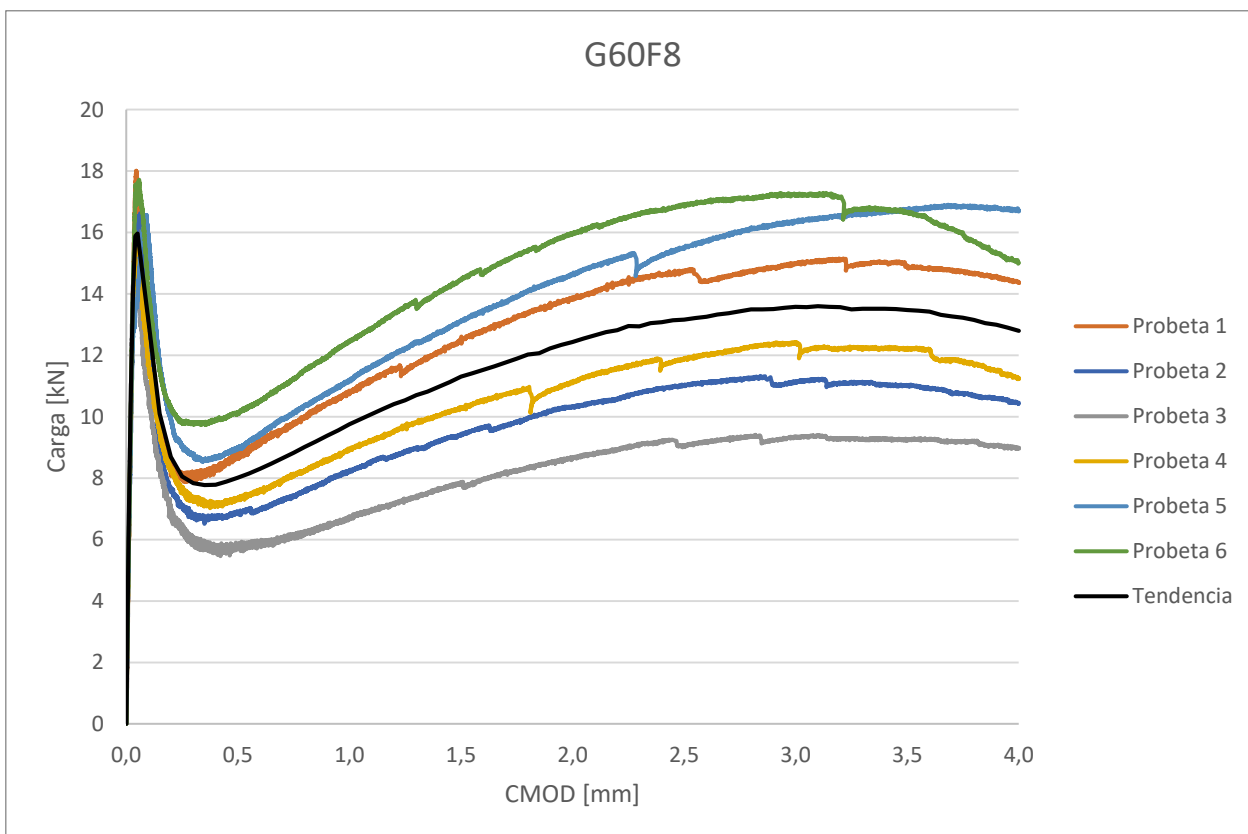


Figura 37: Curvas carga-deformación para el hormigón G60 con 8 [kg/m³] de fibras de polipropileno.

Capítulo 5. Análisis de Resultados

5.1. Análisis de resultados obtenidos en laboratorio

5.1.1. Variabilidad de resistencia residual según cantidad de fibra por hormigón

Para poder visualizar de mejor manera el efecto de la fibra como aporte en el refuerzo de las vigas confeccionadas, se disponen los resultados de tal forma que, para cada dosificación de hormigón, se aprecian las distintas curvas características definidas por la cantidad de fibras contenida en la mezcla. Cada curva representa el promedio de las tendencias de los resultados obtenidos para ese hormigón para cada punto de deformación.

Es necesario notar que las curvas obtenidas de los resultados de los ensayos son independientes entre sí, por lo que los máximos de cada una se encuentran posicionados a distintos valores de deformación, lo que significa que los resultados promedio del CMOD y carga del primer pick de los gráficos, no son coincidentes con los valores propuestos en las tablas.

Los resultados son mostrados desde la Tabla 33 hasta la Tabla 37, acompañados de sus respectivas series expuestas desde la Figura 38 a la Figura 42.

Tabla 33: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G20.

G20	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
G20F0	0,1575	1,10	2,06	0,77	0,22	0,18	0,17
G20F2	0,0320	3,25	3,25	0,41	0,47	0,48	0,43
G20F4	0,0744	2,91	3,53	1,02	0,98	1,04	1,05
G20F6	0,0808	2,02	2,70	0,92	0,97	1,05	1,08
G20F8	0,0385	2,17	2,17	1,18	1,54	1,61	1,47

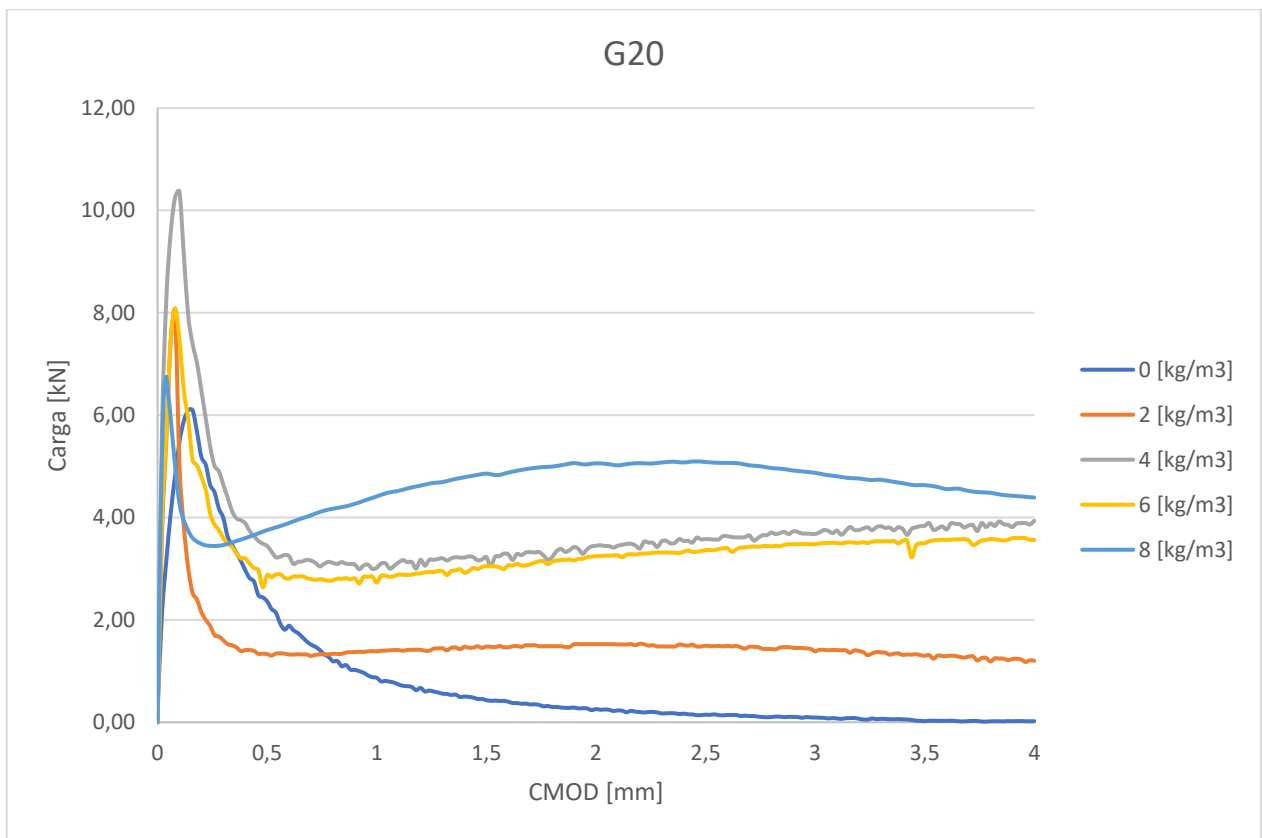


Figura 38: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G20.

Para los hormigones de menor resistencia, i.e., los de mayor relación a/c mostrados en la Figura 38, se tiene que, a mayor cantidad de fibra contenida en la mezcla, mayor resistencia residual adquiere, lo cual era de esperarse por el aporte que genera como refuerzo luego del agrietamiento de las probetas. Por otro lado, se observa que la fuerza máxima que resiste el hormigón varía, teniendo que el máximo es para un contenido de $4 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ de fibra de polipropileno y a medida que aumentó en la matriz, fue disminuyendo la resistencia a la primera fisuración. Notar además que, la curva del hormigón más resistente posee una resistencia ascendente, aunque de la misma manera que las demás las resistencias luego de la fisuración, no sobrepasa los 6 [kN] , lo cual en términos estructurales constituyen valores muy bajos. Una de las razones de este comportamiento deficiente puede ser que la resistencia de la mezcla no alcanza a ser suficiente como para anclar las fibras a la matriz cementicia, lo que se traduce a que este tipo de concreto no es competente para una función estructural.

Tabla 34: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G30.

G30	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
G30F0	0,1131	2,08	3,34	0,53	0,06	0,04	0,04
G30F2	0,0482	3,32	3,36	0,59	0,64	0,65	0,64
G30F4	0,0880	2,72	3,98	1,16	1,01	1,08	1,07
G30F6	0,1260	1,84	3,69	1,51	1,51	1,66	1,77
G30F8	0,0433	3,36	3,36	2,20	3,07	3,39	3,30

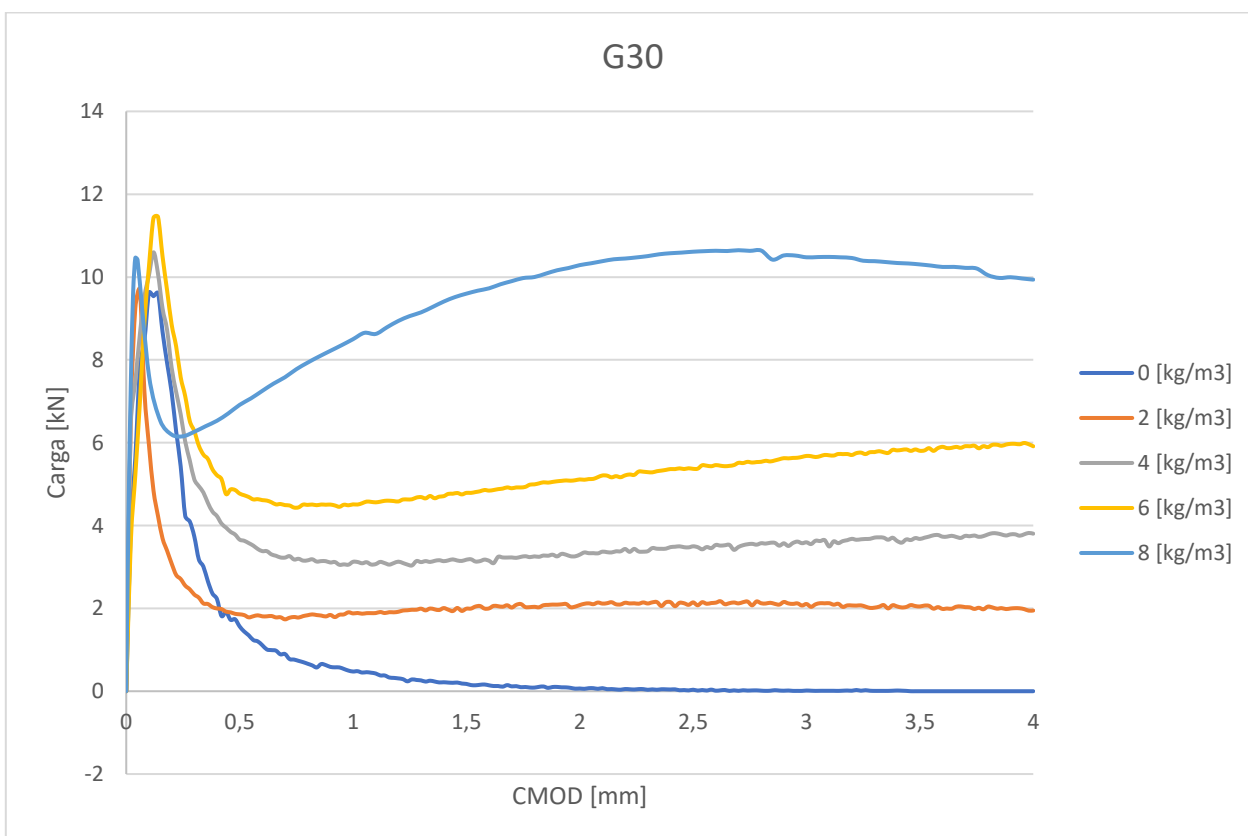


Figura 39: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G30.

En este caso, se tiene un hormigón un poco más resistente que el anterior, y a medida que se le agrega fibra, presenta un mejor comportamiento, tal y como se expone en la Figura 39. Cabe señalar que la variación de la resistencia máxima de la pasta cementicia varía en menor medida con respecto a la situación anterior, aunque los resultados tienden al mismo fenómeno de mejor resistencia con una dosis de $4 [kg/m^3]$ de fibra. También, se debe apreciar que para el mayor grado de refuerzo, las resistencias residuales superan incluso la carga máxima del primer peak por una pequeña cantidad y que, además, evidencia una gran mejora con la adición de la fibra, provocando un gran

salto que alcanza a doblar las cargas soportadas respecto a las dosis que le siguen, las cuales, a pesar de mostrar pequeños ascensos, no desarrollan un aporte real de resistencia en el hormigón.

Tabla 35: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G40.

G40	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
G40F0	0,0550	4,26	4,81	0,11	0,00	0,00	0,00
G40F2	0,0654	3,05	3,27	0,91	0,84	0,89	0,88
G40F4	0,0499	4,35	4,47	1,11	1,39	1,55	1,52
G40F6	0,0412	4,07	4,07	1,65	2,16	2,41	2,45
G40F8	0,0445	3,77	3,78	1,84	2,51	2,85	2,89

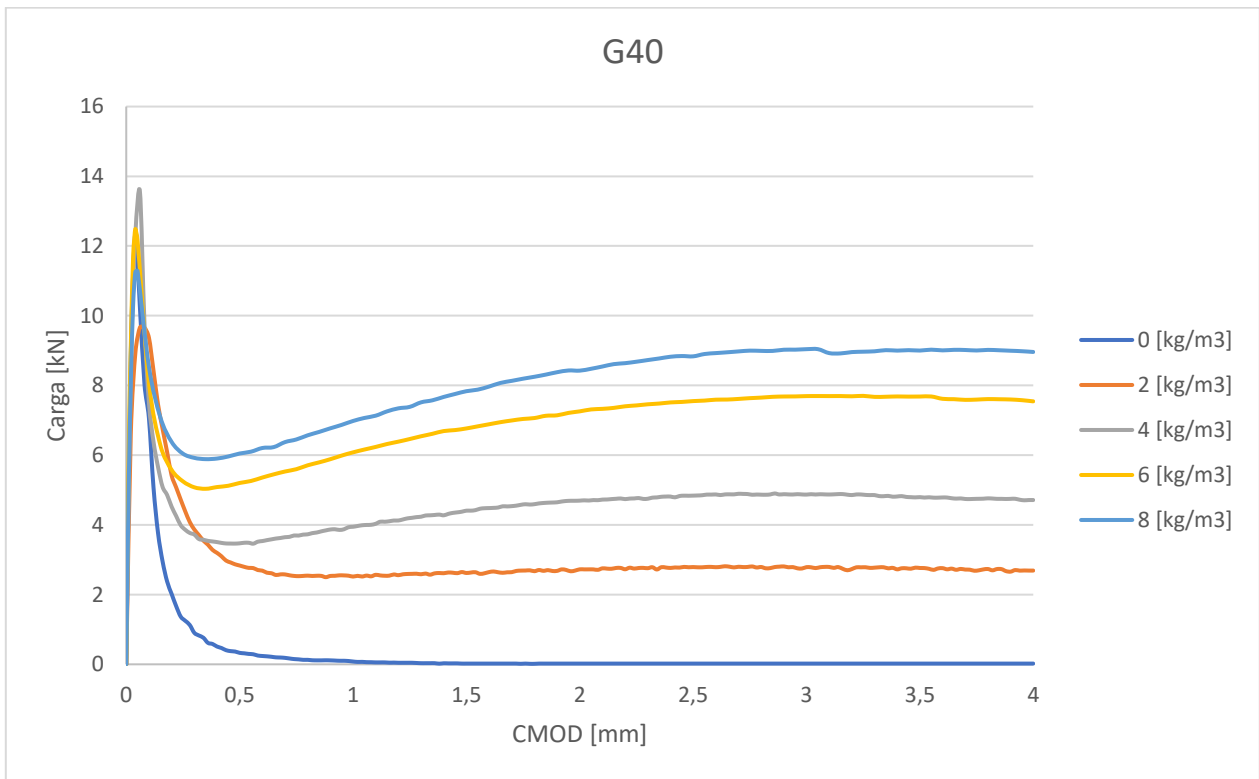


Figura 40: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G40.

En esta serie de curvas, se observa que los distintos hormigones entregaron resultados mejor distribuidos en cuanto a las resistencias mostradas en la Figura 40, teniéndose que en el caso con más cuantía de fibra, la capacidad residual roza los 10 [kN]. Con respecto a los máximos en el primer peak, se tiene que el mejor desempeño fue curiosamente entregado por aquel hormigón sin nada de fibra, aunque se debe notar

que la apertura en la que cede la grieta es muy menor que a las demás. Tal efecto es apreciable en los demás resultados de los ensayos, ya que en general la fibra entrega ductilidad a las probetas, lo cual hace que mientras más fibra contenida tenga el elemento, más demorará en fisurarse frente a una misma velocidad de deformación. También se distingue que la fibra en la dosis más alta de refuerzo es una contribución considerable al soporte de la sollicitación entregada durante el ensayo, pues se puede ver que incluso en la deformación de la apertura de la grieta cercana a los 4 [mm] sigue manteniendo una resistencia sin mostrarse un descenso de la misma, lo cual evidencia su utilidad en términos estructurales.

Tabla 36: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G50.

G50	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
G50F0	0,0624	5,16	6,11	0,16	0,00	0,00	0,00
G50F2	0,0398	5,21	6,04	0,64	0,74	0,81	0,80
G50F4	0,1313	3,64	6,28	1,40	1,04	1,12	1,19
G50F6	0,0462	5,02	5,02	1,77	2,35	2,73	2,87
G50F8	0,0484	5,14	5,15	2,32	3,33	3,85	4,01

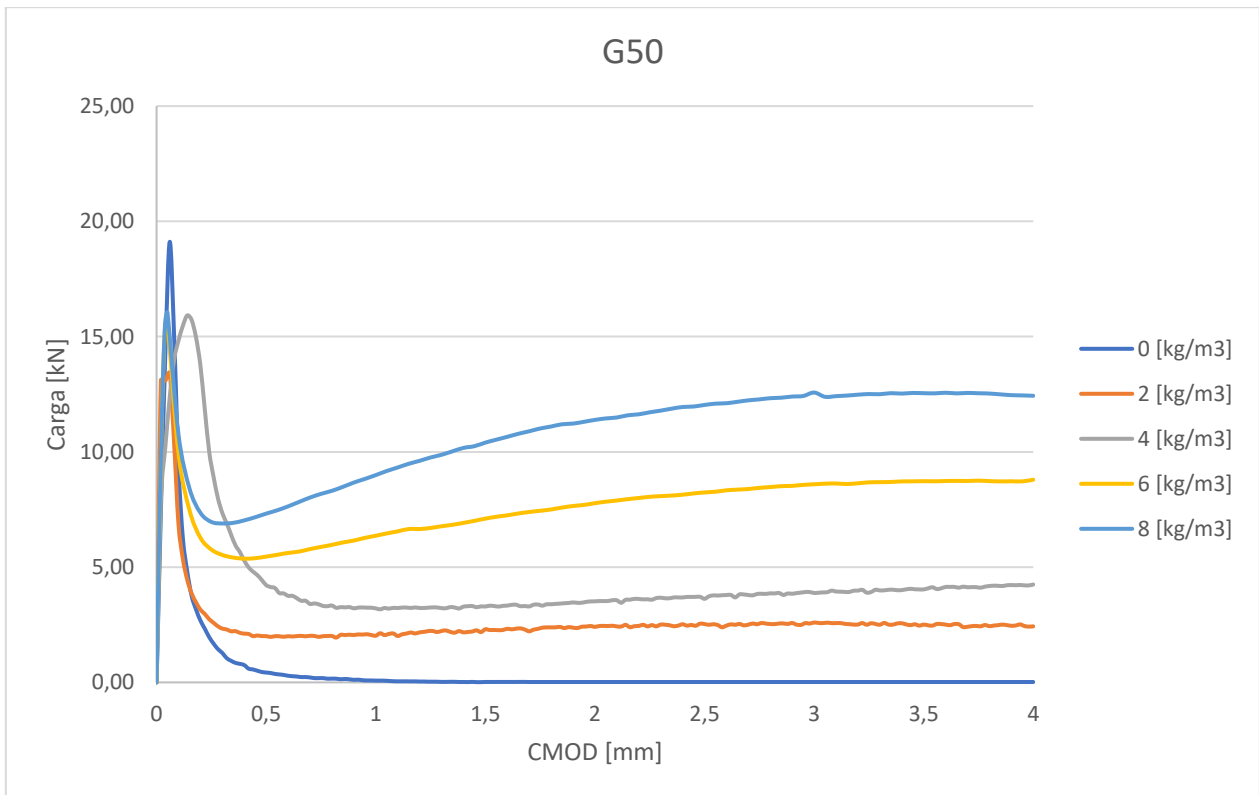


Figura 41: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G50.

Para la situación exhibida en la Figura 41, se tiene un mejor desempeño residual respecto a los casos anteriores. La serie más productiva en términos de resistencia contiene valores que superan los de otros hormigones ya expuestos. Se puede tener en cuenta que el hormigón con más cantidad de fibra entrega un aporte considerable en la resistencia de la probeta luego del comienzo de la fisuración, lo cual se demuestra con el ascenso sostenido que tuvo la curva, superando los 12 [kN], siendo tal comportamiento apto para un concreto con funciones estructurales.

Tabla 37: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones de dosificación G60.

G60	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
G60F0	0,0521	5,80	6,10	0,19	0,00	0,00	0,00
G60F2	0,0520	5,79	6,40	0,73	0,86	0,94	0,90
G60F4	0,1677	2,56	7,33	1,73	1,28	1,46	1,60
G60F6	0,0466	5,31	4,76	1,77	2,24	2,55	2,63
G60F8	0,0577	5,79	5,34	2,97	4,19	4,90	5,01

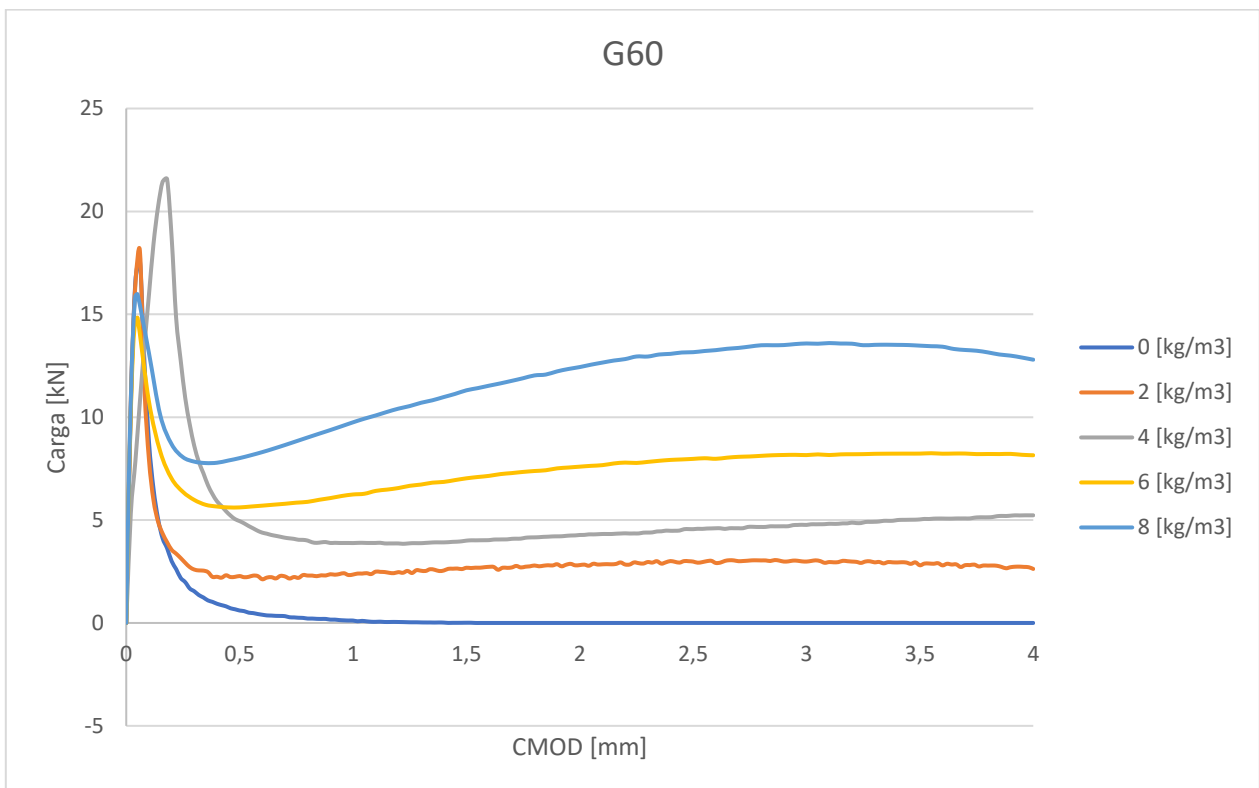


Figura 42: Curvas carga-deformación para los hormigones con dosificación de G60.

En este caso, se tiene la resistencia más alta de las series de hormigones confeccionados para este estudio. Se verifica en la Figura 42 que las resistencias

residuales superan a cada dosificación de fibra con otra resistencia en la mayoría de las situaciones graficadas anteriormente. Notar que estos hormigones tienen gran similitud con los de resistencias G50, lo cual es entendible por los resultados de los ensayos a compresión de los cilindros respectivos mostrados en la Tabla 7, que ponen en evidencia la poca variación de las resistencias a compresión entre ambas dosificaciones de hormigón. De hecho, tales diferencias se condicen con los máximos alcanzados en el primer peak de las series de datos presentados en la Tabla 36 y la Tabla 37. Notar que se da el mismo comportamiento estructural que en el caso anterior, en donde la mezcla con mayor cantidad de fibra de polipropileno muestra un ascenso en la resistencia residual que refleja la aptitud estructural en el diseño.

En general, se distingue un aporte en la resistencia posterior al agrietamiento para hormigones compuestos con dosis de $8 [kg/m^3]$, exhibiendo notoriamente una conducta acorde al diseño estructural. En cuanto a los concretos con menores dosis de refuerzo, hay ocasiones en las que se aprecian ciertos ascensos en la resistencia residual, pero solo constituyen adaptaciones a las nuevas deformaciones y no oposiciones claras que evitan la falla.

En particular, para el caso de las mezclas G20, existe también un aporte de la fibra en su mayor dosificación, pero no lo suficiente como para ser considerable en la dinámica de las sollicitaciones.

5.1.2. Variabilidad de resistencia residual según tipo de hormigón

El impacto que produce el tipo de hormigón utilizado en la resistencia residual puede ser analizado agrupando los resultados de los hormigones por cada dosificación hecha. A continuación, se muestran los gráficos por cantidad de fibra de los ensayos hechos. Nuevamente, cada curva mostrada en esta sección representa el promedio de las tendencias de cada serie obtenida de los resultados.

El producto de este análisis es presentado desde la Tabla 38 a la Tabla 42, y con sus respectivos gráficos mostrados desde la Figura 43 hasta la Figura 47 .

Tabla 38: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones sin dosis de fibra de polipropileno.

ρ [kg/m^3]	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
G20F0	0,1575	1,10	2,06	0,77	0,22	0,18	0,17
G30F0	0,1131	2,08	3,34	0,53	0,06	0,04	0,04
G40F0	0,0550	4,26	4,81	0,11	0,00	0,00	0,00
G50F0	0,0624	5,16	6,11	0,16	0,00	0,00	0,00
G60F0	0,0521	5,80	6,10	0,19	0,00	0,00	0,00

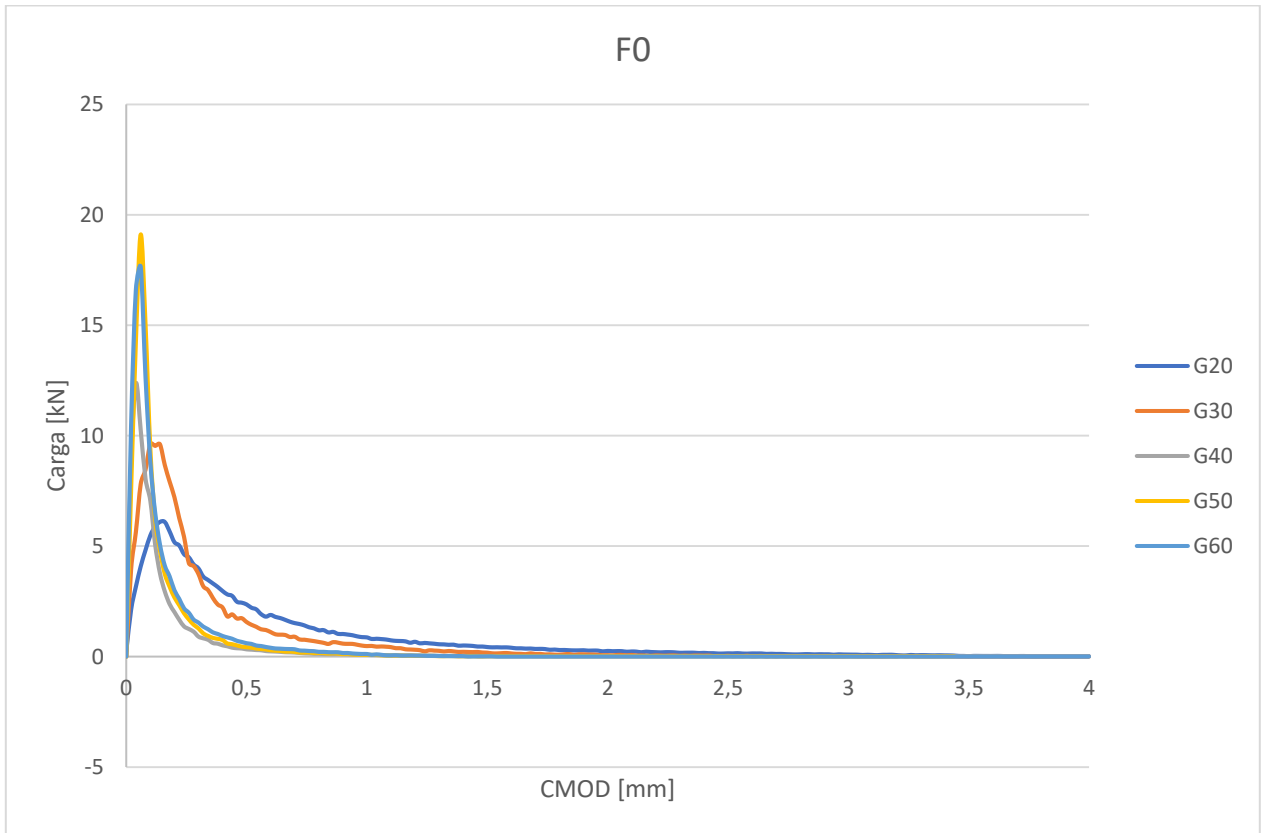


Figura 43: Curvas carga-deformación para los hormigones sin dosis de fibra de polipropileno.

La situación que se visualiza en la Figura 43 es la más desfavorable para el análisis post fisuración, ya que no contienen fibra, por lo que la resistencia mostrada corresponde a la dada netamente por la matriz de hormigón. Se aprecia que el máximo de cada hormigón se da a una deformación distinta, tendiendo a ser menor mientras más resistente es la mezcla, lo cual es perfectamente esperable, ya que los hormigones con mayor relación a/c poseen una mayor capacidad de deformación, pues son elementos más dúctiles.

Tabla 39: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 2 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

2 [kg/m ³]	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	f _{PrimerPeak}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
G20F2	0,0320	3,25	3,25	0,41	0,47	0,48	0,43
G30F2	0,0482	3,32	3,36	0,59	0,64	0,65	0,64
G40F2	0,0654	3,05	3,27	0,91	0,84	0,89	0,88
G50F2	0,0398	5,21	6,04	0,64	0,74	0,81	0,80
G60F2	0,0520	5,79	6,40	0,73	0,86	0,94	0,90

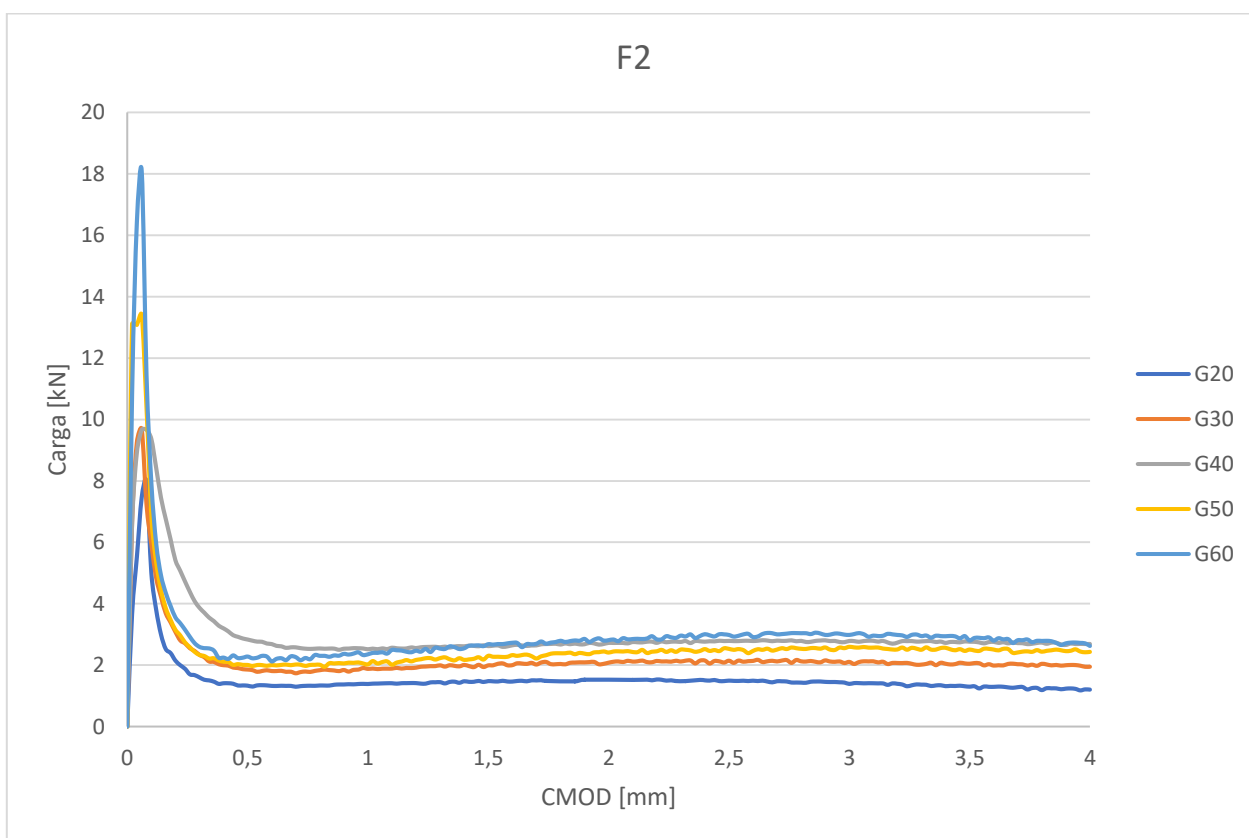


Figura 44: Curvas carga-deformación para los hormigones con 2 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

Para estas series de datos de la Figura 44, se obtiene un comportamiento más parejo entre las distintas resistencias de las mezclas, incluyendo sus respectivas diferencias en cuanto a las resistencias residuales, donde se ve inclinación de mejora a medida que la resistencia del hormigón aumenta. Esta incidencia se constata también en los máximos al inicio del agrietamiento. Se puede visualizar que la adición de 2 [kg/m³] de fibra no incide en un aumento significativo de la resistencia, por lo que su aporte es casi imperceptible estructuralmente.

Tabla 40: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 4 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

4 [kg/m ³]	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	f _{PrimerPeak}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
G20F4	0,0744	2,91	3,53	1,02	0,98	1,04	1,05
G30F4	0,0880	2,72	3,98	1,16	1,01	1,08	1,07
G40F4	0,0499	4,35	4,47	1,11	1,39	1,55	1,52
G50F4	0,1313	3,64	6,28	1,40	1,04	1,12	1,19
G60F4	0,1677	2,56	7,33	1,73	1,28	1,46	1,60

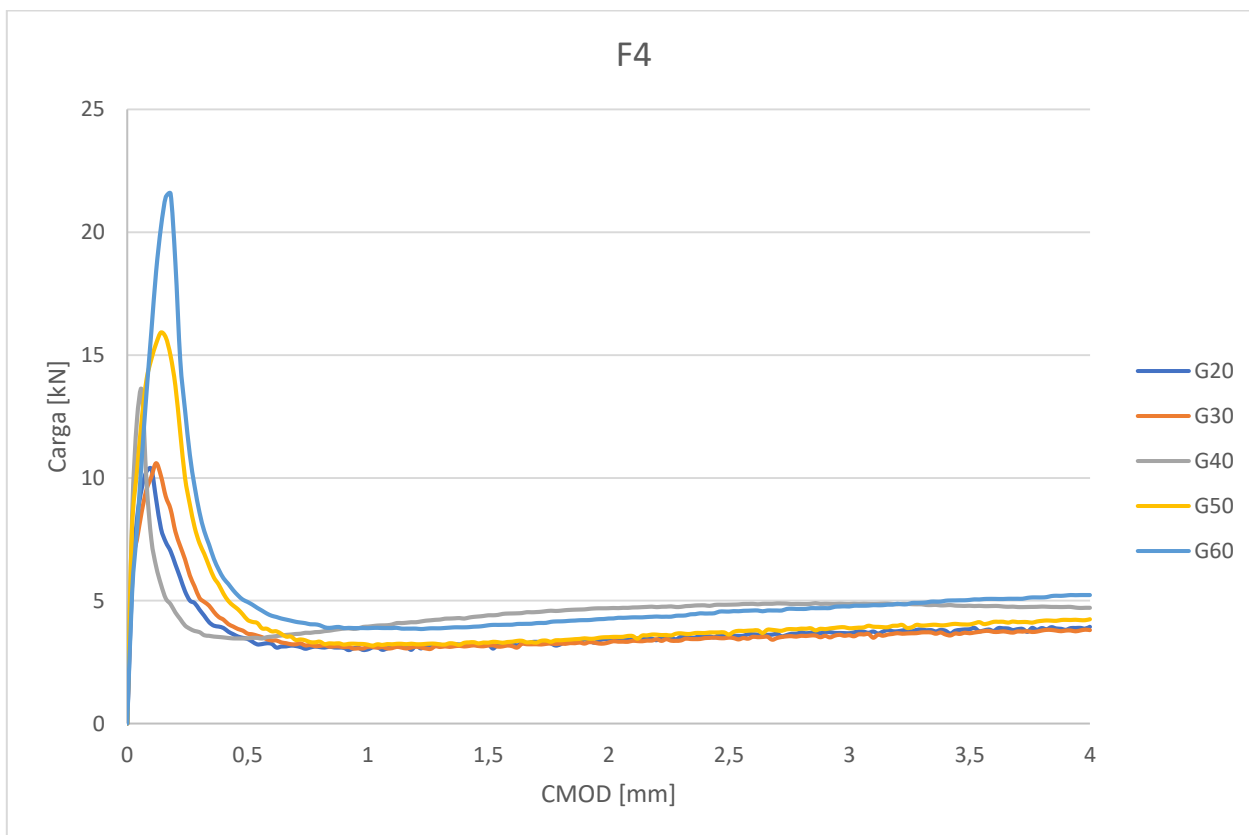


Figura 45: Curvas carga-deformación para los hormigones con 4 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

Para los hormigones dosificados con 4 [kg/m³] graficados en la Figura 45, se tiene una menor dispersión de datos en cuanto al comportamiento post fisuración de las probetas ensayadas, notándose inclusive dos tendencias de resultados en esta fase. En cuanto a las cargas que caracterizan el agrietamiento, poseen la típica predisposición de soportar más mientras más resistente sea. Ahora, en cuanto a la deformación se puede sospechar que la fibra en este caso estaría aportando a la ductilidad, pues a medida que la mezcla se vuelve más resistente, más deformación se soporta en el ensayo. Además, se distingue cierta tendencia al aumento de resistencia en la fase post

agrietamiento, pero no revela una capacidad opositora a la carga, por lo que al igual que en el caso anterior, no hay un aporte estructural real en esta dosificación.

Tabla 41: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 6 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

6 [kg/m ³]	CMOD _{PrimerPeak} [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	f _{PrimerPeak}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
G20F6	0,0808	2,02	2,70	0,92	0,97	1,05	1,08
G30F6	0,1260	1,84	3,69	1,51	1,51	1,66	1,77
G40F6	0,0412	4,07	4,07	1,65	2,16	2,41	2,45
G50F6	0,0462	5,02	5,02	1,77	2,35	2,73	2,87
G60F6	0,0466	5,31	4,76	1,77	2,24	2,55	2,63

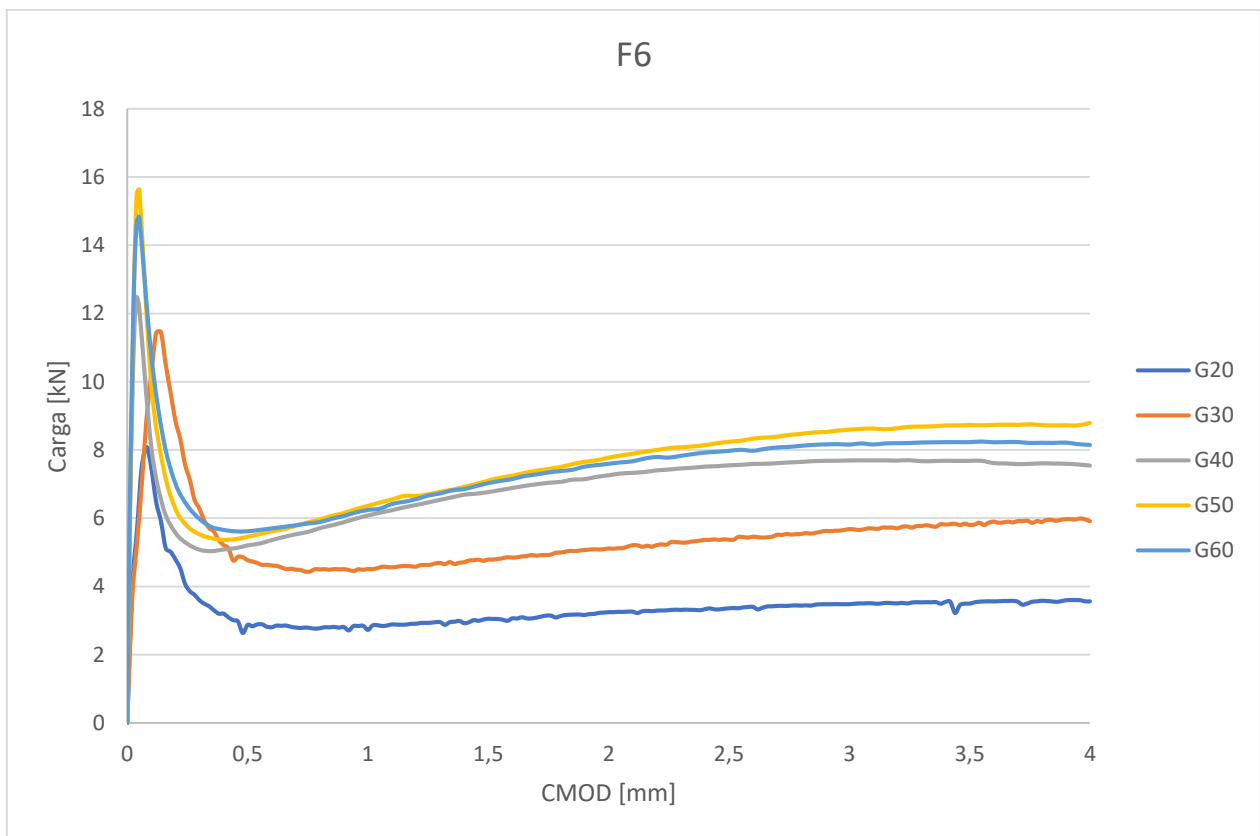


Figura 46: Curvas carga-deformación para los hormigones con 6 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

Para esta dosificación, se tiene una mayor variabilidad de resistencias residuales, aunque las tres mezclas más resistentes a compresión mostraron un comportamiento similar, tal y como se muestra en la Figura 46. Asimismo, se visualiza una suerte de estancamiento del aumento de la resistencia en el tramo posterior a los 2 [mm] de

deformación para estas mezclas, lo que hace sospechar que a pesar de que la fibra ayuda a la probeta a tolerar cerca de 8 [kN] de carga luego del comienzo del agrietamiento, no es suficiente como para asegurar la misma resistencia ya soportada por la matriz cementicia en la primera fase. En cuanto a las cargas máximas soportadas por las series de vigas, se tiene que es consistente con la resistencia de cada hormigón, dándose a una deformación que lleva a intuir que la fibra si aporta a la ductilidad de los prismas aumentándola a medida que sube la resistencia de la matriz, a pesar de que se tiende a esperar el efecto contrario como el mostrado en el caso de las probetas sin fibra de la Tabla 38.

Tabla 42: Resultados promedio de resistencias a flexión para los hormigones con 8 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

8 [kg/m ³]	$CMOD_{PrimerPeak}$ [mm]	Resistencia a flexión [MPa]					
		LOP	$f_{PrimerPeak}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
G20F8	0,0385	2,17	2,17	1,18	1,54	1,61	1,47
G30F8	0,0433	3,36	3,36	2,20	3,07	3,39	3,30
G40F8	0,0445	3,77	3,78	1,84	2,51	2,85	2,89
G50F8	0,0484	5,14	5,15	2,32	3,33	3,85	4,01
G60F8	0,0577	5,79	5,34	2,97	4,19	4,90	5,01

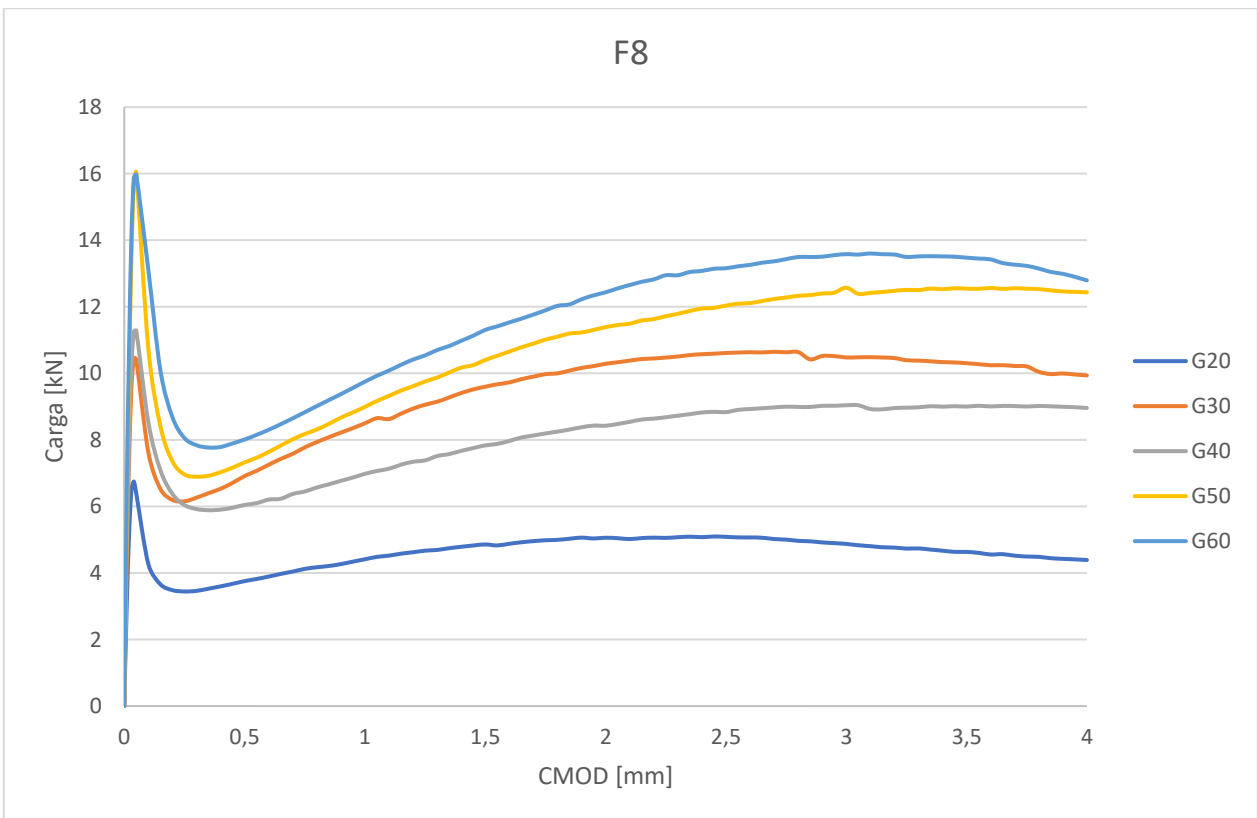


Figura 47: Curvas carga-deformación para los hormigones con 8 [kg/m³] de fibra de polipropileno.

Este último caso corresponde al análisis de los concretos con mayor dosis de fibra sintética. Si se observan los resultados expuestos en la Figura 47, se tiene que existe mayor dispersión en las resistencias residuales respecto a las situaciones anteriores. Además, se puede notar que el aporte que ejerce la fibra sobre el hormigón menos resistente es notoriamente menor en comparación con los más resistentes que tienden a agruparse en cierto sector del gráfico. En definitiva, esta situación hace sospechar que la mezcla con nomenclatura G20 no tiene una consistencia apta para el diseño estructural, probablemente ocasionada por el poco agarre existente entre el refuerzo, i.e., la fibra sintética, y la pasta cementicia. En cambio, para las series de datos G40, G50 y G60 se observa un ascenso de la resistencia que persiste a lo largo del desarrollo de las deformaciones. En cuanto al caso del hormigón G30, los esfuerzos especificados en la Tabla 42 constatan que se llega a tener un segundo peak similar al primero, evidenciando que la fibra resguarda al elemento de la falla aun cuando se repita la misma sollicitación que lo agrietó. Por lo tanto, estos últimos cuatro hormigones muestran un comportamiento idóneo para asegurar una funcionalidad estructural.

Por otro lado, se aprecia la misma tendencia de ductilidad vista en últimos casos, en que la resistencia realmente aporta a la oposición de deformación.

En general, los hormigones con la más alta dosis considerada en este estudio mostraron un comportamiento adecuado como para ser adoptados como refuerzo estructural de un elemento. Hay que destacar la gran similitud que mostraron los hormigones G50 y G60 en cuanto al desarrollo de las resistencias residuales, ocasionado por la similitud de las resistencias a compresión obtenidas de los ensayos. Por otro lado, la mezcla G20 presenta graves problemas para soportar las sollicitaciones ejecutadas por la máquina, originado por la alta relación a/c de su dosificación que comprometía la fijación de la fibra de polipropileno en la matriz.

Para aquellas series de datos caracterizadas con dosis de fibra de $6 [kg/m^3]$, se tiene un comportamiento que pareciera ser bueno al menos en las mezclas más resistentes, aunque no es suficiente para asegurar la estabilidad estructural de los elementos luego del agrietamiento. En efecto, el ascenso de la resistencia residual es despreciable con respecto a los máximos soportados, lo cual demuestra que, para estos casos, la fibra no adopta la funcionalidad de refuerzo como era de esperarse.

5.2. Funcionalidad estructural de la fibra en el hormigón

Para analizar el desempeño estructural de los hormigones confeccionados en este estudio, se proponen tres criterios internacionales que evalúan su funcionalidad estructural, los cuales son detallados en el capítulo 2.5.3, y cuyos resultados son tratados a continuación.

5.2.1. EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural

Aplicando las ecuaciones (5) y (6) en los valores de las resistencias residuales que ya se tienen, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 43.

Tabla 43: Resultados para evaluar función estructural según el documento EHE-08.

Hormigón	$\frac{f_{R1,k}}{LOP_k}$ [%]	$\frac{f_{R3,k}}{LOP_k}$ [%]	Cumplimiento de Criterios
G20F2	13	15	No
G20F4	35	36	No
G20F6	46	52	Sí
G20F8	54	74	Sí
G30F2	18	20	No
G30F4	43	40	Sí
G30F6	82	90	Sí
G30F8	65	101	Sí
G40F2	30	29	No
G40F4	26	36	No
G40F6	41	59	Sí
G40F8	49	76	Sí
G50F2	12	16	No
G50F4	38	31	No
G50F6	35	54	No
G50F8	45	75	Sí
G60F2	13	16	No
G60F4	68	57	Sí
G60F6	33	48	No
G60F8	51	85	Sí

Para verlo de una forma más clara, se puede notar mediante la Figura 48 la variación existente entre cada coeficiente en función de la cantidad de fibra de polipropileno para cada grado de hormigón considerado en el estudio.

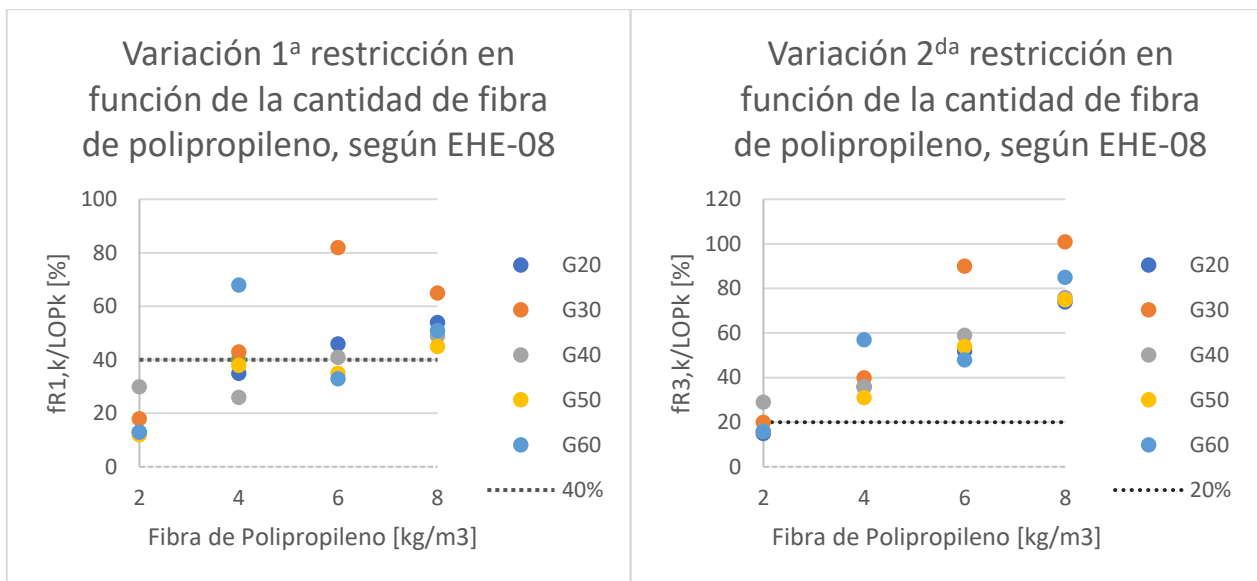


Figura 48: Variación de las restricciones en función de la cantidad de fibra de polipropileno para cada grado de hormigón, según criterio de EHE-08.

De lo anterior, se puede observar que la condición más restrictiva, y por lo tanto la más crítica, se da para el primer coeficiente analizado. En este escenario es importante destacar el trasfondo de su significancia en el análisis, pues este parámetro de medición expone la caída del esfuerzo que tolera la probeta en una deformación para $CMOD = 0,5 [mm]$ respecto a lo que soporta la matriz cementicia antes de que la fibra actúe. En contraste a esto, se tiene la segunda restricción que mide comparativamente la caída del esfuerzo soportado por la viga en una deformación igual a $CMOD = 2,5 [mm]$ respecto al resistido por la matriz al comienzo. Este último descenso es similar al primero en cuanto a los resultados expuestos en la Tabla 43, pero la restricción propuesta por el documento para este coeficiente es menos exigente, tolerando un mínimo del 20% del LOP_k . Esto sugiere una mayor preocupación de la caída inmediata, la cual es más relevante por denotar un aseguramiento de que la fibra actúe de manera efectiva como refuerzo en el comienzo del estado post fisuración del hormigón.

Por otro lado, del cumplimiento de los criterios mostrados en la Tabla 43, se tiene que una dosis de fibra de polipropileno de $8 [kg/m^3]$ asegura que, bajo el criterio español descrito anteriormente, la fibra tenga una función estructural en el elemento de hormigón confeccionado con las características presentadas en esta investigación. En cuanto a dosis más bajas, se debiera analizar caso a caso el cumplimiento de tales condiciones. Y para mezclas con dosificación de $2 [kg/m^3]$ de fibra, es claro que no cuentan con atributos estructurales, al menos para este criterio. A modo de resumen, se cuenta con el esquema propuesto en la Figura 49 que muestra en color verde aquellas mezclas que cumplen con las indicaciones tratadas en esta sección, y que por lo tanto cuentan con funcionalidad estructural.

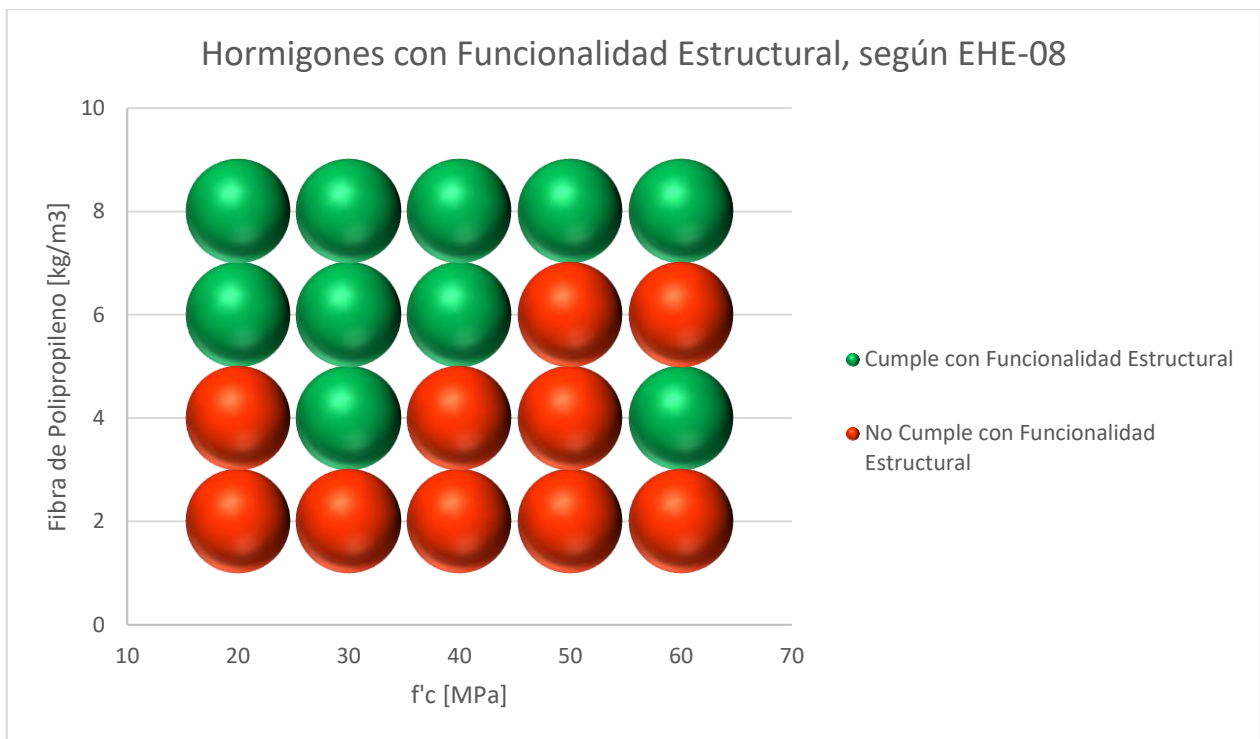


Figura 49: Cumplimiento de criterio de funcionalidad estructural según el documento EHE-08.

5.2.2. EN 14889-2 Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad

De acuerdo a los resultados mostrados desde la Tabla 33 a la Tabla 37 y aplicando las indicaciones especificadas en (7) y (8), se obtiene la Tabla 44, de donde se concluye que todos los hormigones con dosis de fibra de 8 $[kg/m^3]$, excepto aquel con menor relación a/c , cumplen con el criterio propuesto, lo mismo sucede con aquellos de dosis de 6 $[kg/m^3]$, y respecto a los con dosis de 4 $[kg/m^3]$ sólo cumple aquel con nomenclatura G60. Lo anterior indica que la resistencia de la matriz de hormigón influye en la resistencia residual, probablemente ayudando a la adherencia de la red fibrosa con respecto a la matriz cementicia. Notar que, en general, aquellos hormigones que cumplen con los criterios presentan un aumento en la resistencia residual, lo cual alude al aporte que ofrece la fibra como refuerzo dentro de la matriz.

Tabla 44: Resultados para evaluar función estructural según el documento EN 14889-2.

Hormigón	$f_{R1,k}$ [MPa]	$f_{R4,k}$ [MPa]	Cumplimiento de Criterios
G20F2	0,41	0,43	No
G20F4	1,02	1,05	No
G20F6	0,92	1,08	No
G20F8	1,18	1,47	No
G30F2	0,59	0,64	No
G30F4	1,16	1,07	No
G30F6	1,51	1,77	Sí
G30F8	2,20	3,30	Sí
G40F2	0,91	0,88	No
G40F4	1,11	1,52	No
G40F6	1,65	2,45	Sí
G40F8	1,84	2,89	Sí
G50F2	0,64	0,80	No
G50F4	1,40	1,19	No
G50F6	1,77	2,87	Sí
G50F8	2,32	4,01	Sí
G60F2	0,73	0,90	No
G60F4	1,73	1,60	Sí
G60F6	1,77	2,63	Sí
G60F8	2,97	5,01	Sí

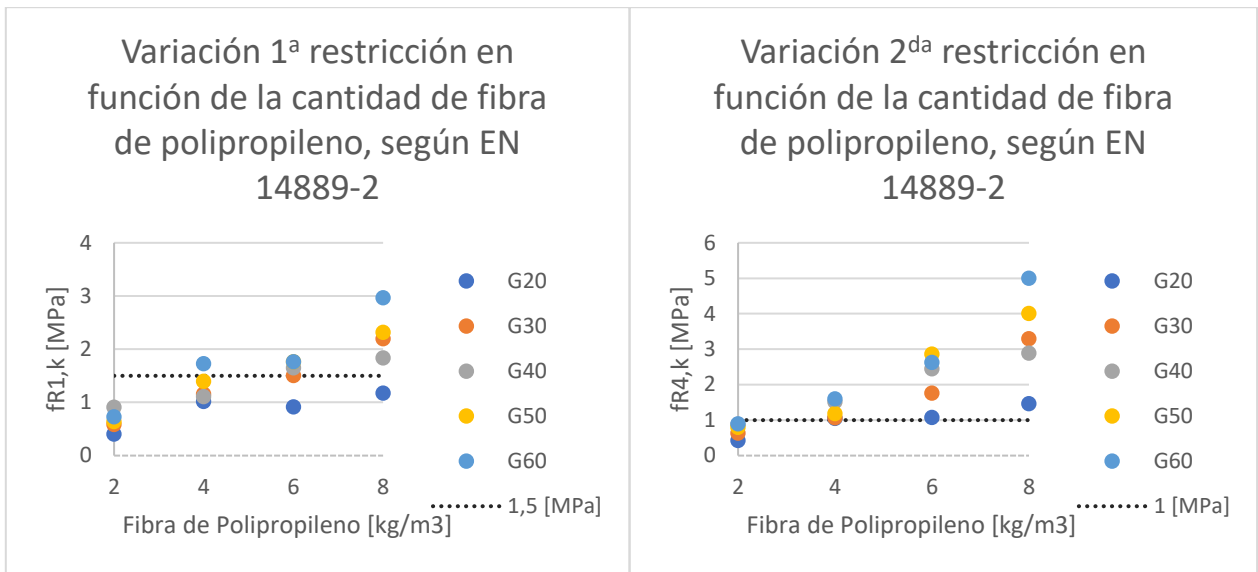


Figura 50: Variación de las restricciones en función de la cantidad de fibra de polipropileno para cada grado de hormigón, según criterio de EN 14889-2.

Luego, de la Figura 50 se desprende la misma inclinación de exigencia en las resistencias del comienzo de la fisuración al igual que en el criterio anterior, aunque en este caso no se considera dentro del análisis la caída existente respecto del esfuerzo ejercido por la matriz cementicia representada numéricamente por el parámetro LOP_k .

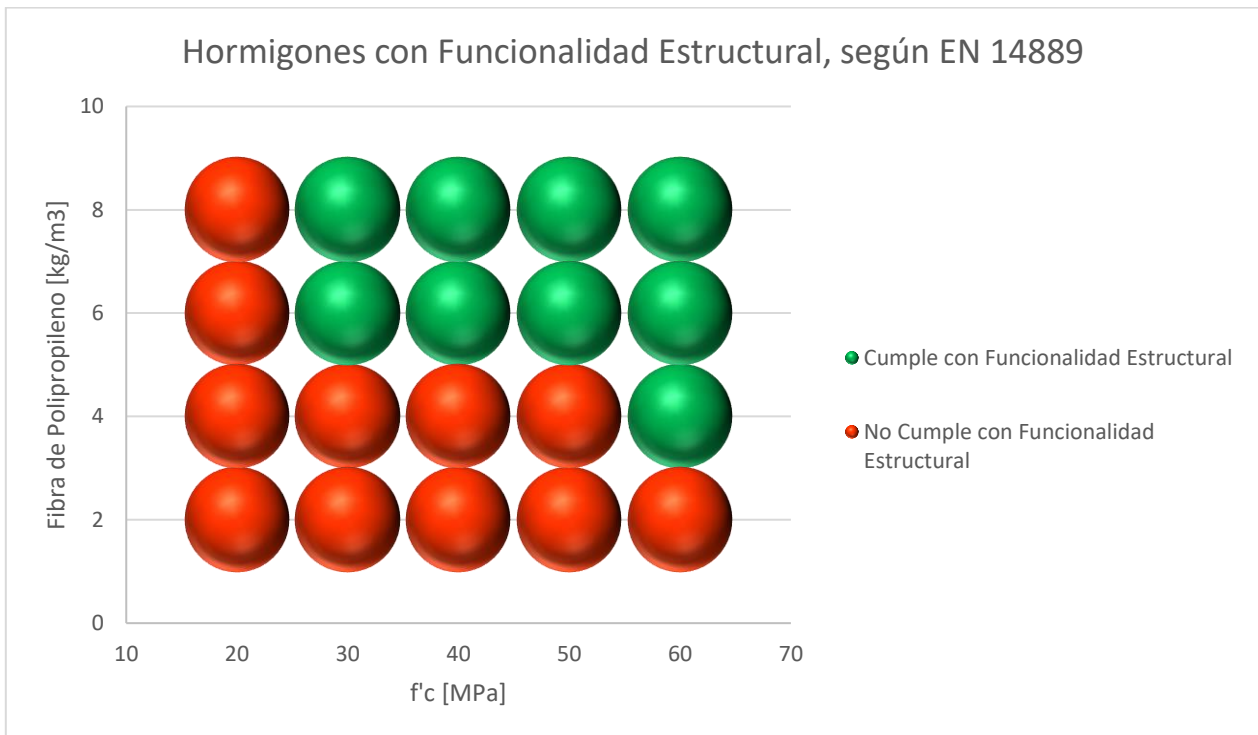


Figura 51: Cumplimiento de criterio de funcionalidad estructural según el documento EN 14889.

Notar que este criterio en particular no evalúa la caída existente entre la resistencia residual y el parámetro LOP_k , sino que simplemente establece ciertos mínimos de resistencia sin considerar el aporte que ejerce la matriz cementicia antes de que se desarrollen deformaciones mayores a $CMOD = 0,05 [mm]$, por lo que mientras mayor sea el grado de resistencia del hormigón, mayor será el agarre entre la red fibrosa y la matriz, que deriva en el desarrollo de resistencias residuales mayores. Esta tendencia se puede apreciar en la Figura 51, en donde la serie de hormigones G20 carecen de funcionalidad estructural, al contrario de la serie G60, donde la mayoría de las mezclas cumplen con este criterio.

5.2.3. Model Code 2010

Según los resultados expuestos en el informe y empleando las expresiones indicadas en (9) y (10), se tienen los valores mostrados en la Tabla 45.

Tabla 45: Resultados para evaluar función estructural según el documento MC (2010).

Hormigón	$\frac{f_{R1,k}}{LOP_k}$	$\frac{f_{R3,k}}{f_{R1,k}}$	Cumplimiento de Criterios
G20F2	0,13	1,17	No
G20F4	0,35	1,02	No
G20F6	0,46	1,14	Sí
G20F8	0,54	1,36	Sí
G30F2	0,18	1,10	No
G30F4	0,43	0,93	Sí
G30F6	0,82	1,10	Sí
G30F8	0,65	1,54	Sí
G40F2	0,30	0,98	No
G40F4	0,26	1,40	No
G40F6	0,41	1,46	Sí
G40F8	0,49	1,55	Sí
G50F2	0,12	1,27	No
G50F4	0,38	0,80	No
G50F6	0,35	1,54	No
G50F8	0,45	1,66	Sí
G60F2	0,13	1,29	No
G60F4	0,68	0,84	Sí
G60F6	0,33	1,44	No
G60F8	0,51	1,65	Sí

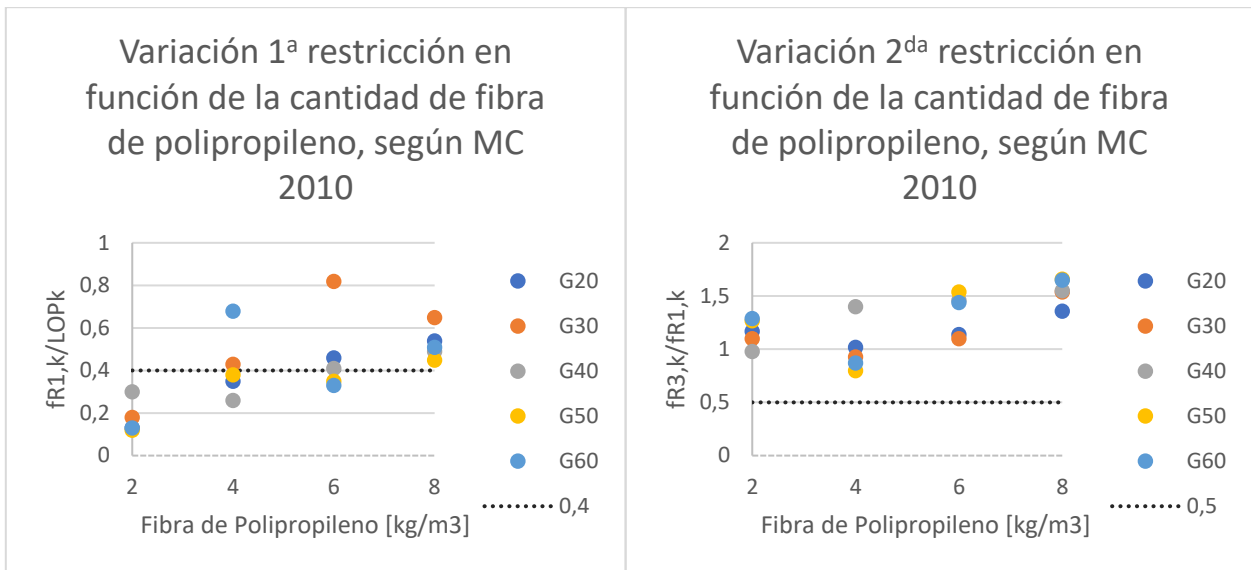


Figura 52: Variación de las restricciones en función de la cantidad de fibra de polipropileno para cada grado de hormigón, según criterio de MC 2010.

Es necesario notar que en este caso se propone como segunda restricción la cuantificación de la caída entre un par de resistencias residuales, en donde, se sugiere que $f_{R3,k}$ al menos sea la mitad del valor de $f_{R1,k}$, lo cual refleja una preocupación por mantener la oposición a la sollicitación a medida que se deforma la probeta, tratando de que no decaiga más allá del 50% durante gran parte de la fase post fisuración.

De la Figura 52 se desprende que la segunda restricción se cumple para todos los hormigones, y la primera se vuelve la condicionante crítica en esta evaluación, siendo la misma que propone el documento EHE-08, por lo que se obtienen los mismos resultados de los cumplimientos de la funcionalidad estructural, tal y como se muestra en la Figura 53.

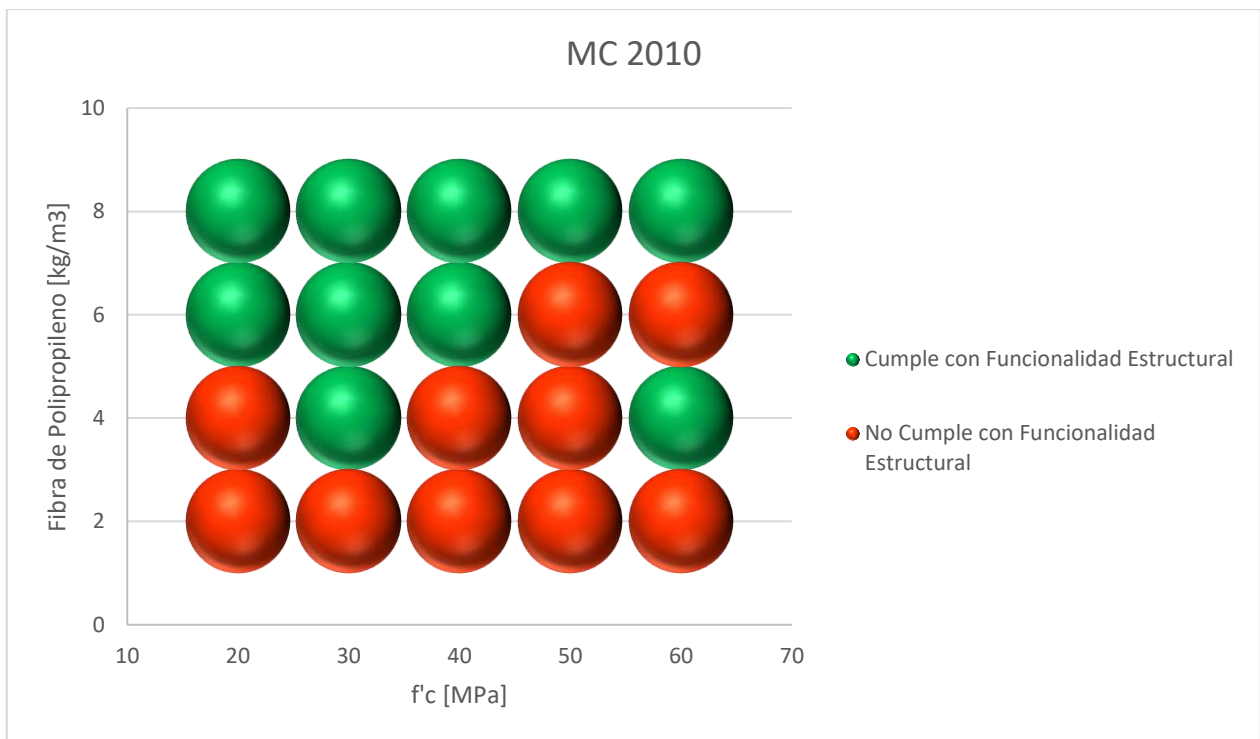


Figura 53: Cumplimiento de criterio de funcionalidad estructural según el documento MC 2010.

5.2.4. Análisis comparativo de los criterios considerados

El criterio del Model Code (2010) no es el mismo que el sugerido por EHE-08, aunque la primera restricción es la misma, por lo que se llega a la misma conclusión respecto al aporte en la funcionalidad estructural de la fibra de polipropileno para cada hormigón confeccionado en el estudio, en donde, el comportamiento de aquellos con dosificaciones de $8 [kg/m^3]$ es aceptable y la fibra logra sustituir total o parcialmente un elemento. Cabe notar que algunas mezclas con dosis de $4 [kg/m^3]$ y de $6 [kg/m^3]$ cumplieron con las condicionantes planteadas, teniéndose el caso de resistencia G30 apto para el desempeño estructural en ambos casos, e incluso algunos con nomenclatura G20.

Respecto al criterio propuesto por el documento EN 14889, se excluye totalmente del análisis la resistencia máxima que pueda alcanzar el hormigón antes de la fisuración sólo se le da importancia a los valores que alcanzan las resistencias residuales. Por lo que bajo esta evaluación la proporción de caída de los esfuerzos se vuelve irrelevante.

En definitiva, aquellos hormigones que cumplen con las tres comprobaciones técnicas especificadas son aquellos con la mayor dosis de fibra de polipropileno, sin incluir aquella con nomenclatura G20, incluyendo también algunas mezclas con dosis de $6 [kg/m^3]$ para los hormigones G30 y G40. En cuanto a la dosis de fibra de $4 [kg/m^3]$ sólo se tiene considera suficiente el desempeño entregado por la mezcla G60. Este escenario, concuerda con las hipótesis introducidas en el análisis de los resultados que avalan que las mezclas más resistentes con $8 [kg/m^3]$ de fibra, muestran funciones estructurales en su desempeño frente a solicitaciones. En la Figura 54 se muestra una esquematización de los resultados obtenidos, de donde se ve cierta tendencia de que,

para los hormigones más resistentes, bajas cantidades de fibra no aportan en la funcionalidad estructural. Para el caso de los hormigones G20, no se aprecia ningún aporte en la funcionalidad estructural, lo cual es probablemente causado por la baja adherencia entre la matriz cementicia y la red fibrosa contenida como refuerzo. Por otro lado, se tiene el caso aislado del hormigón G60F4 que representa una inconsistencia en la tendencia de los resultados, pues la serie de hormigones con ese grado de resistencia tiene gran similitud con la de grado G50, pues los valores de las resistencias a compresión son muy parecidos, tal y como lo demuestra la Tabla 7. Este último fenómeno puede ser producto de la gran variabilidad que tiene este tipo de ensayos, que derivarían en incongruencias al momento del análisis.

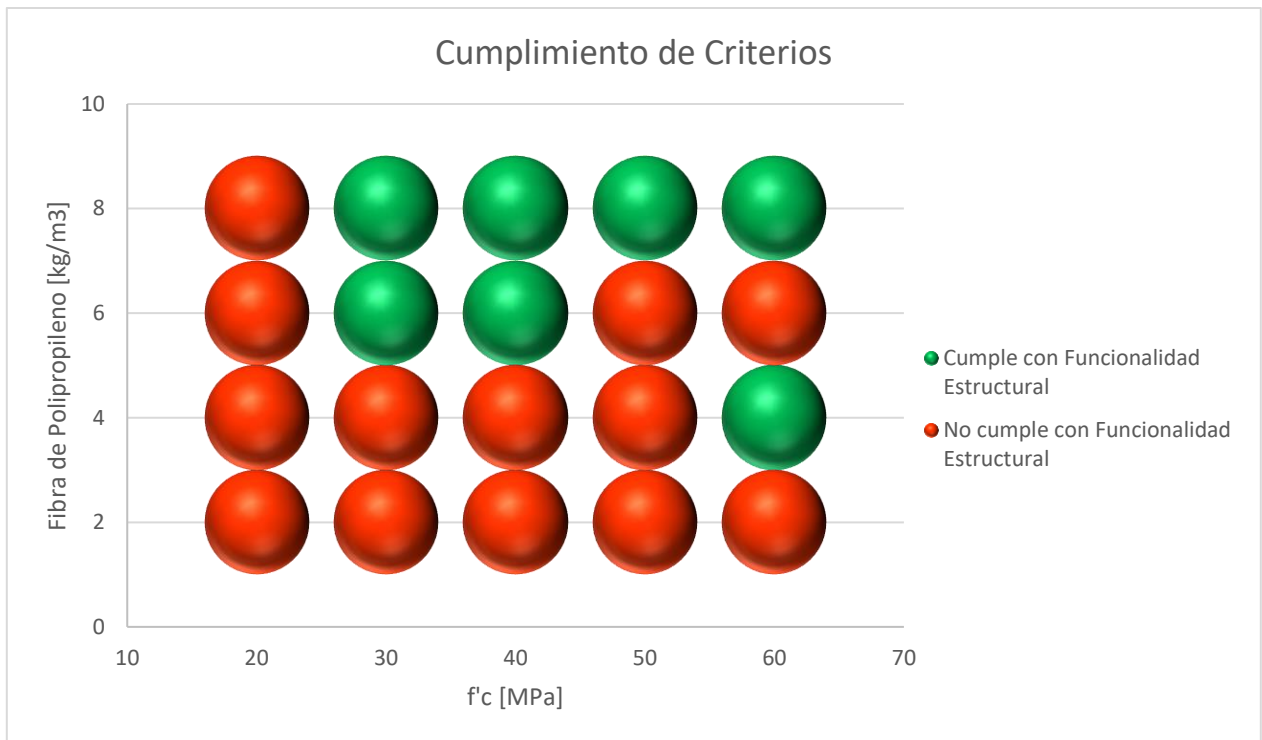


Figura 54: Intersección de los criterios estudiados en la investigación en cuanto al cumplimiento de los criterios de funcionalidad estructural.

Capítulo 6. Conclusiones

Se concluye que, para cumplir con la funcionalidad estructural de hormigones fibroreforzados, es necesario que en el diseño se consideren altas dosis de fibra de polipropileno. Específicamente, en los resultados se obtuvo que una dosis de $8 [kg/m^3]$ de fibra de polipropileno entrega funcionalidad estructural al hormigón, y que cantidades más pequeñas de $6 [kg/m^3]$ son aptas en grados de resistencia del orden de G30 y G40, mientras que en mezclas con mayores resistencias la funcionalidad depende del criterio con el que se analice, lo mismo sucede para hormigones G20. En definitiva, a partir de los resultados finales a los que se llegaron, se deduce que una dosis alta de fibra de polipropileno en un concreto con resistencias a compresión del orden de $30 [MPa]$ a $40 [MPa]$ y que, por supuesto, tenga propiedades de hormigón proyectado, asegura un comportamiento estructural frente a sollicitaciones, ya que, bajo estas condiciones mínimas, ambos materiales adoptan cierto desempeño como el del hormigón reforzado, y para otros grados de resistencia y/o dosis de fibra de polipropileno, es recomendable evaluar caso a caso.

A modo de reflexión, era de esperarse que el hormigón con relación a/c más alta no cumpliera con todos los criterios estructurales propuestos en el análisis, ya que su resistencia no aporta mucho a la adherencia de la matriz cementicia con la red fibrosa contenida, por lo que, al momento del comienzo de la fisuración, la fibra tiende a ceder a la separación con el elemento antes de comenzar su propia ruptura interna. En relación al caso contrario, para el rango estudiado de hormigones más resistentes, se entiende que hay un buen funcionamiento entre la pasta cementicia y la fibra incorporada, incluso las mezclas resultan ser una composición de materiales que otorgan un comportamiento aceptable, aunque hay que notar que con los resultados expuestos en este estudio, se puede establecer que poca cantidad de fibra en concretos de alta resistencia no aportan de forma estructural al elemento ensayado, tal y como se supuso en la premisa.

Para dosis de fibra de polipropileno de $6 [kg/m^3]$ y $4 [kg/m^3]$ en hormigones de buena calidad, pueden tenerse desempeños estructurales, aunque sólo bajo algunos de los criterios utilizados normalmente, como los descritos en este estudio, por lo que existe la probabilidad de que no tengan el refuerzo suficiente como para considerarlos dentro del rango de mezclas con funciones estructurales. En cuanto a dosis aún más bajas, seguramente no cumplirán con ningún criterio estructural, aunque pueden ser un real aporte en la vida útil del elemento sin contribuir en la resistencia a las sollicitaciones.

En cuanto a la resistencia a compresión del shotcrete, hay que tener en cuenta que, por exigencias de resistencias tempranas del hormigón, en la práctica cifras por sobre los $30 [MPa]$ son fáciles de alcanzar, por lo que la restricción propuesta en este ámbito sería totalmente factible.

Por otro lado, los resultados propuestos en este estudio presentan altos índices de variabilidad representados a través de los Coeficientes de Variabilidad, llegando a tomar valores de hasta un 40% para resistencias residuales, lo que pone en evidencia la gran imprecisión del ensayo. Este fenómeno puede ser causado por varias razones. Entre ellas está en primer lugar, la distribución de fibra contenida en el hormigón fresco antes del llenado de los moldes, pues frente a dosis de fibra altas es común ver la aparición de

“erizos” que atentan en contra de la homogeneidad y perjudican las propiedades del concreto. Asimismo, otro factor a considerar es la compactación de las probetas que dañan enormemente la orientación de las fibras, en especial cuando se utiliza la varilla pisón que impulsan el acomodamiento de las fibras verticalmente. Además, existe otra variante que propicia la mala distribución de fibra en la probeta, que es la forma de llenado, aunque para este caso, fue hecha tal y como lo sugiere la norma. Lo dicho anteriormente afecta directamente la orientación y distribución de la fibra de polipropileno contenida en cada probeta, lo cual se ve reflejado en la red de refuerzo que logra cruzar la superficie de falla en el ensayo.

Asimismo, los Coeficientes de Variabilidad pierden validez para el análisis de resultados cercanos a cero, ya que adquieren grandes aumentos porcentuales que carecen de un efecto propio derivado del ensayo. Tal es el caso para la comparación de las variaciones de algunas resistencias residuales a la flexión, en las cuales se registran C.V. que superan el 50%.

En general, uno de los principales aspectos a destacar de las dificultades experimentales es el proceso de trabajo anterior a la obtención de datos, ya que para este tipo de ensayo de HRF, se requieren probetas de viga que superan los 30 [kg], lo cual dificulta su confección (pues se necesita mayor cantidad de material), manipulación para su curado, el transporte hacia el lugar de ensayo y el ensayo mismo, lo cual, además, sugiere que en el proceso haya por lo menos dos personas a cargo por temas de seguridad. Por lo tanto, sería conveniente adoptar un ensayo que tenga asociada la elaboración de probetas de menor tamaño y de fácil manipulación, y que de paso posea una menor variabilidad en los resultados. De esta forma, las investigaciones acordes al tema serían más fáciles de desarrollar, y conllevarían a menores costos de producción y de tiempo.

La incorporación de fibras como refuerzo no sólo ayudan estructuralmente al elemento, sino que entrega otras garantías que no son contempladas en el diseño, como apoyo en la resistencia térmica de los elementos e incluso ayudan a inhibir la propagación de fisuras por retracción del hormigón. Frente a este escenario es que últimamente se vuelve totalmente factible su incorporación en elementos estructurales.

Siguiendo esta misma línea, sería interesante que se continuara investigando el hormigón reforzado con fibras de polipropileno con dosis mayores a las trabajadas en este estudio, pues existe un claro potencial de aplicabilidad estructural en Chile, extendiéndose, incluso a investigaciones que clarifiquen el efecto del largo o de la geometría de la fibra en la resistencia post agrietamiento.

La fibra sintética continúa siendo un material innovador en la industria de la construcción, pues todavía es pequeño su uso al existir gran desconfianza con respecto a su desempeño, y aún más, a su real aporte estructural. Además, a este fenómeno se le suma el hecho de que culturalmente hay gran inercia en cuanto al diseño estructural y el empleo de materiales en la construcción, por lo que la inserción de este material se vuelve un desafío más para el desarrollo de esta industria en el país.

Bibliografía

- ACI. (2000). *ACI 116R-00 Cement and Concrete Terminology*. Estados Unidos.
- ACI. (2013). *ACI Concrete Terminology*. Estados Unidos.
- ACI. (Enero - Febrero de 2014). Structural Design Methodologies for Concrete Pipes with Steel and Synthetic Fiber Reinforcement. *ACI Structural Journal*.
- ASTM. (2003). *C1116 Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete*.
- Blanco, A. (2008). Durabilidad del Hormigón con Fibras de Acero. España.
- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z., & Romualdi, P. (2010). Structural Behaviour of Precast Tunnel Segments in Fiber Reinforced Concrete. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Carmona, S. (2014). Ensayos para la Caracterización y Control de Shotcrete Reforzado con Fibras - Uso del Ensayo Barcelona como Alternativa para el Control de HRF. *Soluciones y Avances Tecnológicos para Proyectos de Túneles*.
- Carmona, S., & Cabrera, M. (2009). Comportamiento al Corte de Hormigones Reforzado con Fibras de Acero. Valparaíso, Chile.
- EHE-08. (2011). *Instrucción de Hormigón Estructural*, p. 607-624. España.
- EN 14651. (2007). *Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)*.
- EN 14889-2. (Febrero de 2008). *Fibras para Hormigón. Parte 2: Fibras Poliméricas. Definiciones, Especificaciones y Conformidad*, p. 11.
- Giaccio, G., Bossio, M., Monetti, D., Morea, F., Torrijos, M., & Zerbino, R. (2013). Macrofibras Sintéticas para el Refuerzo de Hormigón. *Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia*. Argentina.
- ICH. (2015). Guía Chilena del Hormigón Proyectado . *Segunda edición*.
- International Federation for Structural Concrete (fib). (Abril de 2010). Model Code. p. 225.
- Irias Pineda, A. S. (Junio de 2013). Trabajo Fin de Máster. *Refuerzo de Elementos Estructurales con Hormigones con Fibras o Solo Fibras*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- López, J. (Abril de 2015). Tesis para Optar por el Grado de Maestro en Ingeniería. *Análisis de las Propiedades del Concreto Reforzado con Fibras Cortas de Acero y Macrofibras de Polipropileno: Influencia del Tipo y Consumo de Fibra Adicionado*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- MACCAFERRI. (2007). *Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón*. Brasil.
- Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). *Influencia de las Fibras de Polipropileno en las Propiedades del Concreto en Estados Plástico y Endurecido*.

- Meza de Luna, A. (Noviembre de 2015). Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos. *Optimización del Concreto Reforzado con Fibras de Acero y Polipropileno en Pisos Industriales, Basado en Análisis Experimental y Numérico*. Aguascalientes, México: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Meza de Luna, A., Ortiz, J. Á., Lorenzo, J., Pacheco, J., Soto, J. J., Rangel, S., . . . Alvarado, J. (2014). Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Zulia. *Estudio Experimental de Caracterización Mecánica del Concreto Reforzado con Fibras de Acero y de Polipropileno*.
- Molins, C., & Mora, F. (Octubre de 2007). Aplicaciones Estructurales de Hormigón con Fibras. *Distribución y Orientación de las Fibras en Dovelas Fabricadas en Horizontal*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Muntean, R., Cazacu, C., Mizgan, P., Galatanu, T., & Tamas, F. (2016). 10th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG. *Practical Applications of Dispersely Reinforced Concrete with Polypropylene Fibers: Beams*. Transilvania: Rumania.
- Nazar, F. (2016). Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil. *Evaluación Analítico-Experimental del Uso de Fibras de Polipropileno y Acero como Refuerzo en Sostenimientos de Hormigón Proyectado para Túneles Interestación del Metro de Santiago*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- NCh1019.Of74. *Construcción - Hormigón - Determinación de la Docilidad - Método del Asentamiento del Cono de Abrams*.
- NCh1037.Of77. *Hormigón - Ensayo de Compresión de Probetas Cúbicas y Cilíndricas*.
- NCh148.Of68. *Cemento - Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales*.
- NCh2184.Of92. *Hormigón y Mortero - Método de Ensayo - Determinación del Contenido de Aire*.
- Pothisiri, T., Chou, S., & Sektheera, C. (Marzo-Abril de 2016). ACI Structural Journal Technical Paper. *Effect of Polypropylene Fibers and Wire Mesh on Fire Performance of Precast Concrete Walls*.
- Pujadas, P. (2013). *Caracterización y Diseño del Hormigón Reforzado con Fibras Plásticas*. Barcelona.
- Pujadas, P., Álvarez, A., De La Fuente, A., Piliarissi, S., & Aguado, A. (Octubre de 2012). Anais do 54° Congresso Brasileiro do Concreto. *Análisis Comparativo de los Modelos Constitutivos del Hormigón Reforzado con Fibras*.
- Ruano, G., Isla, A., & Luccioni, B. (2014). *Hormigón Reforzado con Fibras Sometido a Temperaturas Elevadas*. Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de Mecánica Computacional.
- Serrano, R., Cobo, A., Prieto, M. I., & González, M. d. (2016). Construction and Building Materials. *Analysis of Fire Resistance of Concrete with Polypropylene or Steel Fibers*, págs. 302-309.
- SIKA. (2014). *Hormigón Reforzado con Fibras*. Santiago, Chile.

UNE-EN 14651:2007+A1. (Junio de 2008). *Método de Ensayo para Hormigón con Fibras Metálicas. Determinación de la Resistencia a la Tracción por Flexión (Límite de Proporcionalidad (LOP), Resistencia Residual)*. Madrid, España.

