

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA
MARIA DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE**



**EQUIVALENCIAS ENTRE LAS RESISTENCIAS RESIDUALES DE LOS HRF DETERMINADAS
MEDIANTE DIFERENTES ENSAYOS DE FLEXIÓN.**

Memoria de titulación presentada por

JORGE RAMÓN DÍAZ SILVA

Como requisito parcial para optar al título de

CONSTRUCTOR CIVIL

Profesor Guía

SERGIO CARMONA MALATESTA

Noviembre 2017

Agradecimientos

Para comenzar agradezco a la UTFSM por la formación entregada durante todo el transcurso de mi carrera universitaria, que ha permitido el desarrollo de esta memoria.

Agradezco la constante disponibilidad del profesor Sergio Carmona, su cooperación y conocimientos brindados y al equipo de laboratorio que dedico grandes esfuerzos en esta campaña experimental.

De manera especial agradezco a mis amigos que amenizaron mi estadía en la universidad y cuyo apoyo fue fundamental a lo largo de mis estudios.

A mi familia, por la motivación a lograr este objetivo y su constante apoyo.

*Dedicado a mis padres,
por su apoyo incondicional y la
fortaleza que me han transmitido
para lograr esta meta. Gracias por
la confianza depositada y el gran
esfuerzo que han hecho para que
esto se haga realidad.*

Resumen

El Hormigón Reforzados Fibras (HRF) es cada vez más usado como material estructural, especialmente en estructuras de sostenimiento de túneles, elementos prefabricados, pisos industriales y pavimentos viales. Sin embargo, las dificultades derivadas de la falta de parámetros únicos y comunes han dificultado el establecimiento de procedimientos experimentales de uso generalizado, lo que ha limitado las aplicaciones estructurales de los HRF. Es así como las normas ASTM C1609 y la norma europea EN 14651 proponen ensayos conceptual y experimentalmente diferentes y establecen parámetros equivalentes.

El objetivo de esta memoria ha sido establecer diferentes relaciones tipo código que permitan relacionar las resistencias residuales obtenidas con los dos ensayos antes mencionados, para hormigones reforzados con 25 kg/m^3 y 40 kg/m^3 de fibras de acero. Estas equivalencias se han definido a partir de la apertura de fisura, dado que, para una misma apertura, los esfuerzos experimentados en el HRF determinado según ambos métodos son proporcionales.

A partir de relaciones obtenidas a partir de la cinética de una probeta agrietada se han establecido relaciones entre la deflexión de la viga y la apertura de la fisura de la viga ensayada con cargas a los tercios, según la norma ASTM C 1609, las que han sido validadas con los resultados obtenidos por medio de diferentes campañas experimentales.

También se determinó la relación entre la apertura de la fisura y la profundidad del eje neutro de la probeta, para ambos ensayos.

Finalmente, se estableció una proporción que permite relacionar los resultados con ambos ensayos, lo que facilitaría el uso de un ensayo u otro indistintamente.

Abstract

Fiber Reinforced Concrete is being used more and more as a structural material, especially in underground support structures, pre-fabricated elements, industrial floors and road pavements. However, difficulties derived from the lack of unique and common parameters, have restricted the establishment of Generalized used experimental procedures, which have restrained FRC structural applications. That's how ASTM C1609 and EN 14651 Standards bring forward conceptual and experimentally different tests and establish equivalent parameters.

The aim of this study has been to set different code-type relationships that allows to link up the residual strength to both standards previously mentioned, for concretes reinforced with 25 kg/m^3 and 40 kg/m^3 of steel fibers. These equivalencies have been defined as of the crack opening, given that, for the same crack opening, the experimental strengths determined in both standards are proportional.

Starting From the parameters based on the already cracked specimen's kinetics, relationships between deflection and crack opening on the third-point loading beam have been set, as shown in ASTM C1609 Standard Test Method, which have been validated in different experimental campaigns.

The relationship between crack opening and depth of neutral axis was also determined in this study.

Finally, a ratio to link the results of both tests was set, to ease the use of both methods indistinctly.

Glosario

HRF: Hormigón Reforzado con Fibras.

Fibras: Filamentos esbeltos y alargados en forma de mallas, manojos o hilos de cualquier material sea natural o artificial, que pueda ser distribuido en una mezcla de hormigón fresco.

Ductilidad: Es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin romperse, es decir, tener grandes deformaciones conservando una buena resistencia.

Tenacidad: Corresponde a la cantidad de energía que es capaz de absorber un material sometido a cargas, antes de alcanzar un cierto nivel de deformación.

Diámetro Equivalente: Diámetro de un círculo con un área igual al área media de la sección transversal de la fibra.

Relación de Aspecto: Relación entre la longitud (l) y el diámetro equivalente de la fibra.

CMOD: Desplazamiento del borde de la fisura (**CMOD, Crack Mouth Opening Displacement**). Desplazamiento lineal, medido por un transductor, a lo largo del eje longitudinal de la probeta, y corresponde a la apertura de la fisura generada al ejercer una carga en el centro del vano de la viga descrita en el método EN 14651.

COD:(Crack Opening Displacement): Corresponde al desplazamiento lineal medido por un transductor ubicado en la cara inferior de la probeta, y corresponde a la apertura de fisura experimentada por la probeta descrita en el método ASTM C1609, al someterse a una carga a los tercios de la luz de ensayo.

Deflexión: Desplazamiento lineal, medido por un transductor instalado tal y como se especifica en el apartado 7.1 y en la figura 5, sobre un prisma sometido a una carga puntual centrada F .

Resistencia Residual a la tracción por flexión: Tensión ficticia en el fondo de la entalla que se supone actúa, en el caso de una distribución lineal de esfuerzos, en una sección no agrietada en el centro del vano de un prisma sometido a una carga puntual central F_j correspondiente a $CMOD_j$, donde $CMOD_j > CMOD_{FL}$ o a $\delta_j > \delta_{FL}$ ($j=1,2,3,4$)

Resistencia Residual: Corresponde a los valores de esfuerzo, obtenidos a partir de la Curva Carga-Deflexión o Carga-CMOD para determinados característicos de deflexión.

Índice General

Resumen	4
Abstract	5
Glosario	6
Índice General	7
Índice de Figuras	9
Índice de Tablas	11
Índice de Ecuaciones	11
Capítulo 1. Introducción	12
Antecedentes	12
Objetivos	13
Metodología	13
Capítulo 2. Marco Teórico	14
Hormigón Reforzado con fibras	14
Clasificación de las fibras	17
<i>Fibras de Acero</i>	18
Aplicaciones	20
Normativa y Ensayos para determinar el comportamiento a flexión del HRF	22
<i>Ensayo según Norma ASTM C1609</i>	22
<i>Ensayo según Norma EN 14651</i>	26
Capítulo 3. Programa Experimental	28
Materiales	28
Dosificación	31
Confección de Probetas	31
Capítulo 4. Resultados y Análisis	34
Corrección de las Mediciones	34
<i>Método ASTM C1609</i>	34
<i>Método EN 14651</i>	36
Resultados	37
<i>Resultados Ensayos ASTM C1609</i>	37
<i>Resultados Ensayo EN 14651</i>	38
Análisis de Resultados y Equivalencia	39
<i>Análisis Método ASTM C1609</i>	39

<i>W Estimado ASTM C1609 - HRF-25</i>	47
<i>W Estimado ASTM C1609 - HRF-40</i>	48
<i>Análisis Método EN 14651</i>	50
Equivalencia entre las resistencias residuales calculadas mediante los ensayos ASTM C1609 y EN14651.....	53
<i>Esfuerzos Método EN 14651 a partir de ASTM C1609</i>	58
<i>Esfuerzos Método ASTM C1609 a partir de EN 14651</i>	60
Capítulo 5: Conclusiones	63
Capítulo 6: Referencias	64

Índice de Figuras

Fig.1: Curva Carga-Deflexión para distintos tipos de hormigón	14
Fig.2: Relación entre Energía Absorbida y Relación de Aspecto	15
Fig.3: Relación entre carga de agrietamiento y agarre de las fibras.....	16
Fig.4: Efectos de fibras quebradas sobre la tenacidad del HRF	16
Fig.5: Efecto de la cantidad de fibras en la ductilidad	17
Fig.6: Tipos de fibra según su forma	19
Fig.7: Fibras con gancho (De izq a der: 3D,4D y 5D).....	19
Fig.8: HRF Proyectado con Sistema Robotizado	20
Fig.9: Esquema ensayo ASTM C1609.....	22
Fig.10: Ejecución Ensayo ASTM C1609	23
Fig.11: Transductor medidor de deflexión	24
Fig.12: Transductor medidor de apertura de fisura	24
Fig.13: Esquema ensayo EN14651.	26
Fig.14: Entalla Probetas EN14651.	27
Fig.15: Fibra utilizada (Dramix 3D 65/35 BG)	30
Fig 16: Confección de Probetas	32
Fig.17: Representación parámetros de ensayo ASTM C1609.....	34
Fig.18: Representación parámetros de ensayo EN14651	36
Fig.19: Resultados ASTM C1609. Curvas Carga-Deflexión, Carga-COD.....	37
Fig.20: Resultados EN14651. Curvas Carga-CMOD	38
Fig.21: Modelo simplificado agrietamiento (ASTM C1609).....	39
Fig.22: Modelo ASTM C1609 (Agiertamiento Progresivo).....	42
Fig.23: Diagrama de Esfuerzos ASTM C1609	42
Fig.24: Estimación de Profundidad de Eje Neutro ($x(x=f(w))$) (ASTM C1609))	44
Fig.25: w_{est} v/s w_{real} (HRF-25).....	47
fig.26: w_{est} v/s w_{real} (HRF-40)	48
Fig.27: Relación W_{est} - W_{real} (Promedio) y Diferencia Est-Real	49
Fig.28: Modelo EN 14651.....	50
Fig.29: Diagrama Esfuerzos EN14651.....	51
Fig.30: Estimación de Profundidad del Eje Neutro ($(x=f(w))$) (EN 14651))	52
Fig.31: Fórmulas Esfuerzos Reales y Normalizados ASTM C1609, EN14651.	53

Fig.32: Esfuerzos HRF-25 ASTM C1609, EN14651.	54
Fig.33: Esfuerzos HRF-40 ASTM C1609, EN 14651	55
Fig.34: Relación k real y k normal HRF-25	56
Fig.35: Relación k real y k normal HRF-40	57
Fig.36: Esf. Reales y Normalizados HRF-25 (EN14651 a partir de ASTM C1609)	58
Fig.37: Esf. Reales y Normalizados HRF-40 (EN14651 a partir de ASTM C1609)	59
Fig.38: Esf. Reales y Normalizados HRF-25 (ASTM C1609 a partir de EN 14651)	60
Fig.39: Esf. Reales y Normalizados HRF-40 (ASTM C1609 a partir de EN 14651)	61

Índice de Tablas

Tabla 1: Granulometría Arena	28
Tabla 2: Propiedades del Árido	29
Tabla 3: Propiedades de la fibra	30
Tabla 4: Dosificación Inicial	31
Tabla 5: Dosificación Corregida	31
Tabla 6: Detalle Amasadas	32
Tabla 7: Identificación Probetas HRF-25, HRF-40	33
Tabla 8: Coeficientes k (HRF-25, HRF-40)	57
Tabla 9: Equivalencia CMOD-Deflexión (ASTM C1609 a EN 14651)	62
Tabla 10: Equivalencia Deflexión-CMOD (EN 14651 a ASTM C1609)	62

Índice de Ecuaciones

Ecuación Nº1: Estimación de w en función de la deflexión	41
Ecuación Nº2: Esfuerzos Reales(1) ASTM C1609.....	43
Ecuación Nº3: Esfuerzos Reales (2) ASTM C1609.....	43
Ecuación Nº4: Cálculo de $x=f(w)$ (ASTM C1609)	43
Ecuación Nº5: Estimación de w a partir de la deflexión y "x"	46
Ecuación Nº6: w ensayo EN 14651.....	50
Ecuación Nº7: Esfuerzos Reales (1) EN 14651.....	51
Ecuación Nº8: Esfuerzos Reales (2) EN 14651.....	52
Ecuación Nº9: Cálculo de $x=f(w)$ (EN 14651).....	52
Ecuación Nº10: Coeficiente Correlación Esfuerzos Reales k_{real}	56
Ecuación Nº11: Coeficiente Correlación Esfuerzos Normalizados k_{normal}	56
Ecuación Nº12: Correlación Esfuerzos Reales ASTM-EN	58
Ecuación Nº13: Correlación Esfuerzos Normalizados ASTM-EN	58

Capítulo 1. Introducción

Antecedentes

El hormigón es un material ampliamente utilizado en la construcción. Su cualidad más importante es poseer una alta resistencia a la compresión, sin embargo una resistencia muy baja a la tracción. Es por esto que se utilizan armaduras de acero para resistir los esfuerzos de tracción a las que son sometidas las estructuras.

En los últimos años ha tenido un gran auge la utilización de fibras metálicas como agregado en el hormigón, que generan un esqueleto en la estructura que otorga al material una capacidad elevada de resistencia a la tracción, una gran ductilidad y tenacidad que le confieren un excelente comportamiento post-agrietamiento.

Dada la facilidad de uso de las fibras, tal como si fueran un agregado más, han llegado a reemplazar al tradicional refuerzo de acero en algunas aplicaciones, principalmente pavimentos, sostenimiento de túneles, estabilización de taludes y elementos prefabricados.

Para cuantificar el aporte que entregan las fibras al hormigón es necesario hacer ensayos a tracción. El ensayo de tracción directa es el que mejor representa su comportamiento, sin embargo, es un ensayo de difícil aplicación, siendo más conveniente la realización de ensayos a tracción indirecta o flexotracción.

Dentro de los ensayos a flexotracción que se aplican en los HRF se encuentran los establecidos en la norma ASTM C1609 y la norma Europea EN 14651. El primero corresponde a un ensayo sobre una probeta prismática cargada a los tercios donde se mide la carga aplicada y la deflexión experimentada por la probeta a lo largo del ensayo. El objetivo es conocer los valores tanto de resistencia residual como tenacidad asociada a determinados valores de deflexión. Por su parte el método EN 14651 corresponde al ensayo sobre probetas prismáticas con entalla cargada en el centro, en las que se mide la carga aplicada, la deflexión y/o la apertura de fisura. El objetivo es conocer los valores de Límite de proporcionalidad y resistencia residual para ciertos valores de apertura de fisura.

Como se mencionó anteriormente, en el método descrito en la norma EN 14651 se utiliza una probeta prismática que posee entalla, lo que permite inducir la grieta en el centro del vano de esta, a diferencia del método ASTM C1609, en el que la grieta puede originarse en cualquier punto del tercio central de la probeta, lo que genera una dificultad en las mediciones, al no poder obtener directamente el valor de la deflexión realmente experimentada por la probeta y generándose una alta variabilidad en los resultados.

Objetivos

- El objetivo de este estudio es establecer una correlación entre los resultados obtenidos con los ensayos de la norma ASTM C1609 y la norma EN 14651, de manera tal que al conocer los resultados aplicando alguno de estos métodos, se pueda obtener el equivalente en el otro método sin la necesidad de realizar el ensayo.
- Confeccionar hormigón con distintas dosis de fibras metálicas para elaborar probetas basadas en lo indicado en las normas ASTM C1609 y EN 14651, utilizando una dosificación propuesta y realizando las correcciones necesarias durante su confección.
- Obtener los valores de resistencia residual para los distintos tipos de hormigón confeccionado y para cada método utilizado, descritos en las normas mencionadas previamente.
- Mediante estos resultados, realizar un análisis que permita determinar una correlación entre los métodos indicados anteriormente para cada dosificación de fibras de acero.

Metodología

Se prepararán hormigones con 25 kg/m^3 y 40 kg/m^3 de fibra de acero Dramix 3D con los que se moldearán probetas de $150 \times 150 \times 530 \text{ mm}$, según lo indicado en la norma ASTM C1609 y probetas de $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$, según norma EN 14651. Posteriormente estas serán curadas y preparadas previo a la realización de los ensayos.

Siguiendo lo especificado en la norma ASTM C1609, se medirá la carga y la deflexión. De manera adicional se medirá la apertura de fisura experimentada por la probeta durante el ensayo, obteniéndose como resultado las curvas Carga-Deflexión y Carga-COD. Por su parte, en los ensayos basados en la norma EN14651 se obtendrá como resultado las curvas Carga-CMOD

Teniendo estos resultados se puede encontrar una relación que permita, a partir de la deflexión, estimar la apertura de fisura, para luego encontrar una correlación entre las resistencias residuales obtenidas según ambas normas.

Capítulo 2. Marco Teórico

Hormigón Reforzado con fibras

El hormigón destaca principalmente por su capacidad para soportar esfuerzos de compresión, sin embargo no tiene una buena capacidad para soportar esfuerzos de tracción y corte. Por esto, tradicionalmente se opta por incluir un refuerzo de acero que permite a la estructura soportar este tipo de requerimientos.

La adición de fibras al hormigón ha dado a este material nuevas propiedades, mejorando sustancialmente su ductilidad y tenacidad. Estas fibras, distribuidas de forma homogénea en el hormigón, generan una micro-armadura que le confiere la capacidad de contener el agrietamiento producido por la retracción y por otra parte, tras la fisura del hormigón, le entrega ductilidad al material y por consiguiente un aumento significativo en la tenacidad.

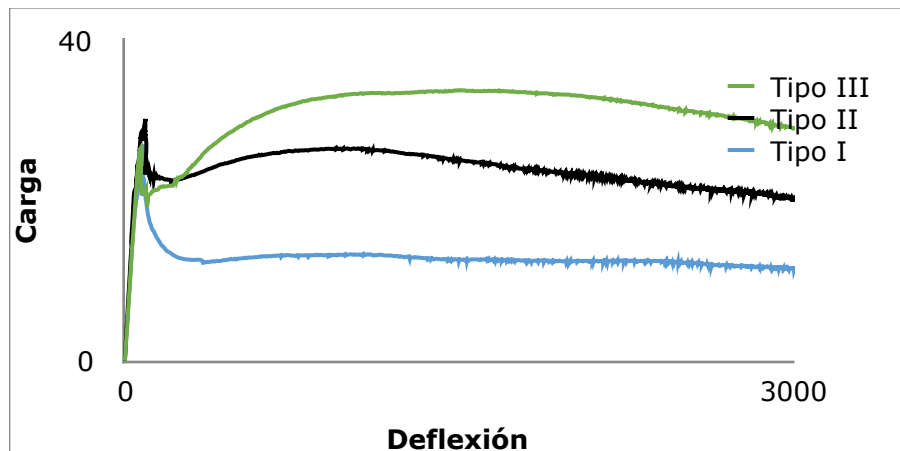


FIG.1: CURVA CARGA-DEFLEXIÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE HORMIGÓN

En la Fig.1 se muestra la curva carga-deflexión para distintos tipos de hormigón:

- El Tipo I, representa un material que contiene una baja dosis de fibras, que posee cierta capacidad para absorber energía tras el agrietamiento y experimenta un colapso más controlado que un hormigón sin fibras.
- El Tipo II, representa un HRF que tras el agrietamiento presenta un comportamiento dúctil y un colapso aún más controlado que en el tipo I.
- El tipo III por su parte, muestra un HRF que tras el agrietamiento, soporta cargas mayores gracias a la acción de las fibras y el colapso es controlado aun en mayor medida.

El comportamiento en cada curva depende de parámetros asociados a la relación de aspecto o esbeltez de las fibras, la forma de estas y la dosificación utilizada.

En primer lugar, la *relación de aspecto o esbeltez* de las fibras corresponde al cociente longitud-diámetro de estas, y es a uno de los parámetros más influyentes en la tenacidad. (Ver.Fig.2)

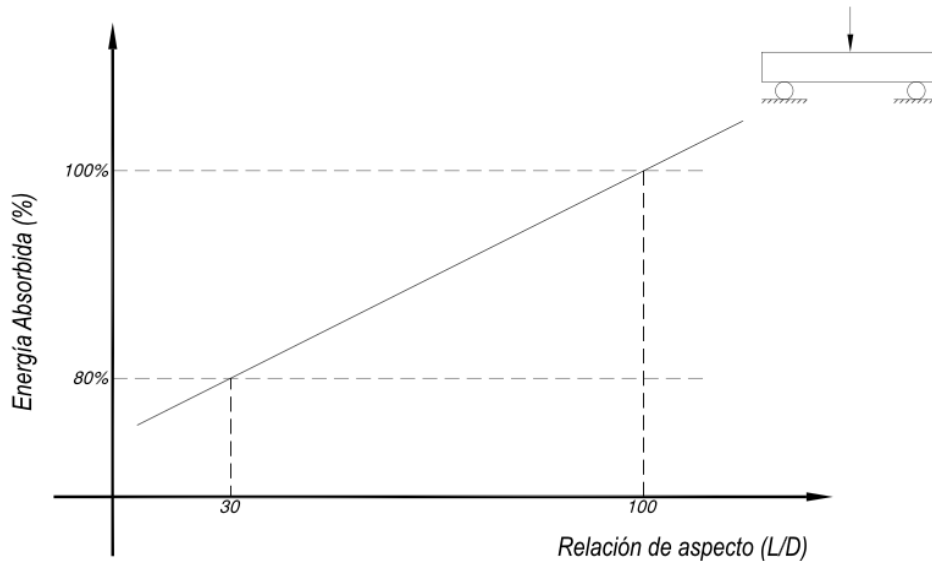


FIG.2: RELACIÓN ENTRE ENERGÍA ABSORBIDA Y RELACIÓN DE ASPECTO

Dependiendo de la forma de las fibras, se tiene una mayor o menor adherencia entre cada una de estas y el hormigón. Mientras mejor sea el agarre de las fibras, podrán efectivamente cumplir su función al resistir los esfuerzos de tracción tras el agrietamiento del hormigón. Como se observa en la Fig.3, una fibra recta al no tener un buen agarre, es arrancada y no permite soportar los esfuerzos de tracción a diferencia de la fibra doblada, donde efectivamente se transmiten los esfuerzos a las fibras.

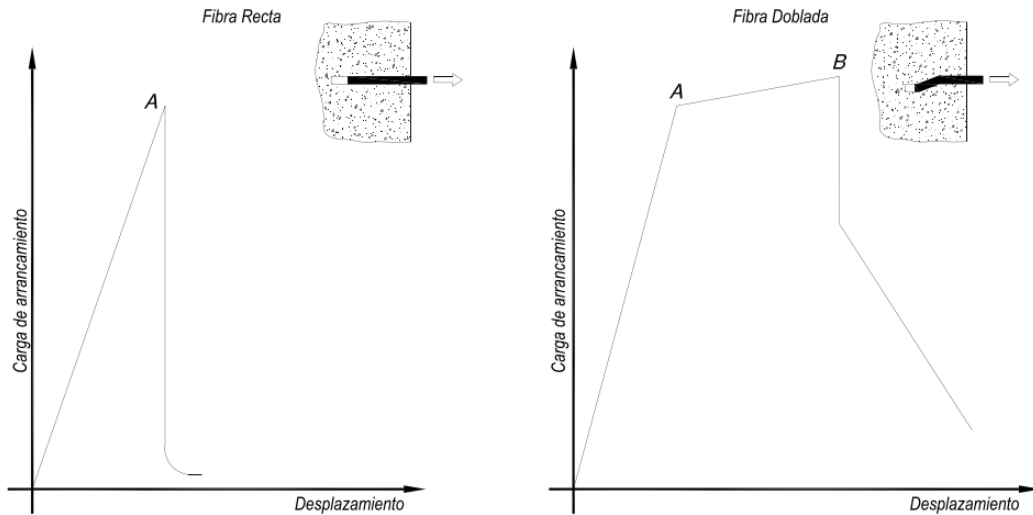


FIG.3: RELACIÓN ENTRE CARGA DE AGRIETAMIENTO Y AGARRE DE LAS FIBRAS

Por otra parte, es importante que las fibras posean una alta resistencia a la tracción, que le permitan absorber la cantidad de energía requerida y no quebrarse prematuramente. Como se observa en la Fig.4, al tener fibras quebradas, la energía absorbida se ve drásticamente disminuida, dado que las fibras no soportan los esfuerzos a los que son sometidas, por lo que el hormigón presenta un comportamiento frágil.

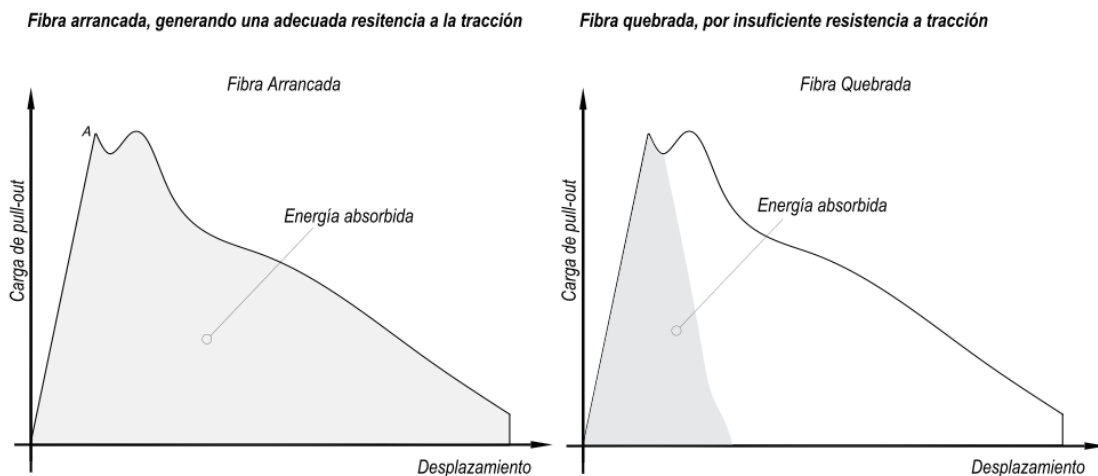


FIG.4: EFECTOS DE FIBRAS QUEBRADAS SOBRE LA TENACIDAD DEL HRF

Finalmente, como se muestra en la Fig.5, la cantidad de fibras utilizada en el hormigón influye considerablemente en relación a las características mecánicas mencionadas anteriormente, en especial sobre la ductilidad y la tenacidad que adquiere el hormigón.

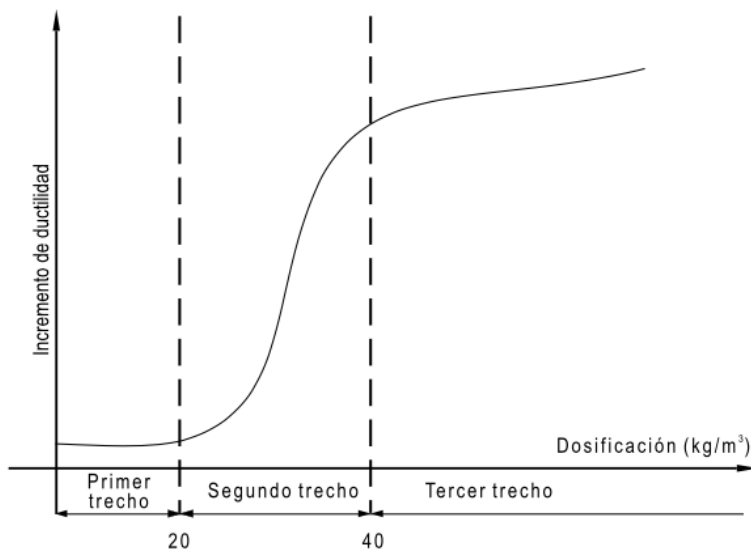


FIG.5: EFECTO DE LA CANTIDAD DE FIBRAS EN LA DUCTILIDAD

Una baja dosificación de fibras en el hormigón no influye considerablemente en el incremento de ductilidad del material, dado que la baja densidad de estas en la mezcla no permite que se encuentren a una distancia tal que formen una micro-armadura resistente. En el segundo intervalo, entre 20 y 40 kg/m³, se tiene un gran incremento en la ductilidad, puesto que las fibras ocupan un mayor volumen relativo al hormigón y estas asumen la resistencia del material tras el agrietamiento. En el tercer intervalo, donde la cantidad de fibras supera los 40 kg/m³, el incremento en la dosificación no genera un efecto significativo en la ductilidad y por el contrario genera un efecto negativo en cuanto a trabajabilidad, puesto que disminuye la docilidad de la mezcla y se genera un hormigón menos homogéneo y potencialmente aglomeración de fibras.

Clasificación de las fibras

La norma ASTM C1116 clasifica al HRF de acuerdo al tipo de fibras incorporadas. El desempeño del HRF depende directamente de la capacidad de las fibras de resistir adecuadamente el proceso de confección del HRF, el proceso de proyección de Shotcrete, un ambiente alcalino al cual será expuesto al estar en contacto con cemento y finalmente soportar las condiciones de servicio a las que estará expuesto. La norma mencionada entrega la siguiente clasificación:

Tipo I: Hormigón Reforzado con fibras de Acero (Inoxidable, aleación, al carbón)

Las fibras de acero no sufren daños durante el proceso de mezclado del hormigón y son compatibles con el ambiente alcalino en el que se encuentran expuestos al estar en contacto con cemento.

Tipo II: Hormigón Reforzado con fibras de vidrio

Estas fibras tienen la desventaja de sufrir deterioros producto de la exposición al álcali presente en el cemento, a menos que sean especialmente producidas con resistencia a este elemento o utilizando cemento bajo en álcali o una adición mineral. Además pueden sufrir daño en el proceso de mezclado del hormigón y a la exposición constante a la humedad.

Tipo III: Hormigón Reforzado con fibras Sintéticas

Las fibras de polipropileno, polietileno y nylon son resistentes a la humedad y álcalis. Estas fibras poseen alta resistencia a la tracción, mejoran la resistencia al impacto y las explosiones y sirven para controlar la retracción del hormigón.

Por otra parte, dependiendo del tamaño de las fibras, estas se pueden clasificar para distintos usos:

- **Microfibras:** Utilizadas para evitar el agrietamiento producido por retracción plástica. Estas fibras poseen diámetros entre 0.023 y 0.050 mm. Se utilizan para prevenir la aparición de grietas en el hormigón fresco y durante las primeras 24 horas tras su colocación. Su dosificación se encuentra entre 0,3 y 1,2 kg/m³.
- **Macrofibras:** Permiten prevenir la aparición de grietas en el hormigón en estado endurecido y si esta se presenta, reduce el ancho de la fisura y mejora el comportamiento mecánico del hormigón post-fisuración. Aumenta la tenacidad del hormigón y permite que tras el agrietamiento, el material siga soportando grandes niveles de carga. La dosificación se encuentra entre 0,2 a 0,8% del volumen del hormigón y las fibras más utilizadas son las de acero y sintéticas con relaciones de aspecto entre 20 y 100.

Fibras de Acero

La norma ASTM A820 (Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete) establece los requerimientos para el uso de fibras de acero en el HRF. En ella se entregan los siguientes parámetros para caracterizar estas fibras metálicas:

A = área Transversal , mm²

d = diámetro, mm

f_u = Resistencia a la tracción, MPa

l = largo, mm

λ = l/d = Relación de Aspecto o esbeltez.

En esta norma se clasifican las fibras de acuerdo al método de fabricación de estas:

- Tipo I: Alambre estirado en frío
- Tipo II: Laminas Cortadas
- Tipo III: Extraídas por rascado en caliente
- Tipo IV: De Acero fundido
- Tipo V: Alambre estirado en frío modificado

Con respecto a su forma, las fibras de acero pueden tener variadas formas, como se muestra en la Fig.6. Axialmente, pueden ser rectas u onduladas y transversalmente pueden ser circulares, rectangulares o irregulares.


Tipos de fibras según su forma	Esquema
Recta de sección circular	
Recta de sección rectangular	
Ondulada	
Recta con extremos en forma de cono	
Recta con extremos en forma de gancho	
Rectas con extremos chatos	

FIG.6: TIPOS DE FIBRA SEGÚN SU FORMA

Con respecto a su presentación estas pueden ser encoladas o sueltas. El uso de fibras encoladas permite un mezclado más fácil en el hormigón y permiten tener una distribución de fibras más homogénea.

Dentro del grupo de las fibras rectas con extremos de ganchos se distinguen tres tipos, denominadas 3D,4D y 5D por Bekaert en sus fibras Dramix como se muestra en la Ilustración 7. Estos ganchos evitan el arranque de las fibras de la masa de hormigón durante el proceso de tracción gracias a estos ganchos y al ser encoladas se evita que estas se aglomeren dentro de la mezcla de hormigón.



FIG.7: FIBRAS CON GANCHO (DE IZQ A DER: 3D,4D Y 5D)

Aplicaciones

El uso de fibras metálicas en el hormigón, mejora las propiedades mecánicas a tracción y disminuye el efecto de la retracción plástica del hormigón. Estas nuevas propiedades permiten su aplicación en campos como elementos prefabricados, pavimentos industriales, soporte para excavaciones subterráneas y superficiales mediante el uso de hormigón proyectado y revestimientos prefabricados y fabricados in situ en el caso de túneles.

Revestimiento primario y final de túneles

Cuando se construye un túnel mediante el método convencional de excavación, esto es, mediante el uso de voladuras o abatimiento mecanizado del terreno, se debe estabilizar la cavidad generada por el avance del túnel de forma inmediata, mediante la utilización de hormigón proyectado reforzado con fibras, eventualmente complementado con elementos estructurales como marcos, pernos de anclaje o mallas, como se muestra en la Ilustración 8.



FIG.8: HRF PROYECTADO CON SISTEMA ROBOTIZADO

Este soporte primario debe garantizar la seguridad de los trabajadores y la estabilización de la cavidad a corto plazo y posteriormente cuando se tiene el revestimiento definitivo, este debe soportar las cargas para las que fue diseñado con una alta confiabilidad.

Pavimentos

El hormigón reforzado con fibras es utilizado en losas que serán sometidas a flexión, como en los pavimentos industriales, portuarios y de carreteras. Las fibras constituyen un refuerzo en múltiples direcciones, dada su distribución homogénea en el hormigón, lo que permite aprovechar estas características para el diseño a flexión o para los efectos producidos por la retracción y la temperatura.

Por otra parte, el HRF permite aumentar la distancia entre las juntas de control, en comparación a los refuerzos convencionales, dada la capacidad de las fibras se contrarrestar los efectos producto de la temperatura y la retracción.

Elementos Prefabricados

El uso del HRF para elementos prefabricados es cada vez mayor, dado que logra en algunos casos reemplazar completamente el refuerzo tradicional de acero y permite una mayor eficiencia en el proceso de fabricación de estos elementos. Uno de los campos de aplicación más importante, es su utilización como refuerzo estructural en obras subterráneas. Se ha incluido como nueva tecnología la inclusión de fibras metálicas como sustituto total o parcial de la armadura tradicional de acero, aumentando las prestaciones del hormigón, como son la ductilidad, mayor resistencia a cargas cíclicas, resistencia al corte y esfuerzos puntuales. En el caso de túneles construidos utilizando TBM (Tunneling Boring Machine), máquina que es capaz de realizar la excavación a sección completa del túnel, y que a la vez coloca los elementos de sostenimiento necesarios, compuestos por dovelas reforzadas tradicionalmente mediante armaduras de acero.

Normativa y Ensayos para determinar el comportamiento a flexión del HRF

Ensayo según Norma ASTM C1609

Método de Prueba Estándar para desempeño a la flexión de hormigón reforzado con fibras (Utilizando una viga con carga a los tercios)

Este método de ensayo evalúa el desempeño a la flexión del HRF utilizando parámetros derivados de la curva Carga-Deflexión, obtenida ensayando una viga simplemente apoyada, con dos rodillos que ejercen la carga a los tercios del largo de la viga.

Permite conocer la carga al momento de la fisura y las *resistencias residuales*, determinados previamente los valores de carga residual. Además permite determinar la tenacidad del HRF mediante el área bajo la curva Carga-Deflexión, entregando información sobre la capacidad de absorción de energía del hormigón en estudio.

Se utilizan probetas prismáticas de 150x150x530 mm, con una luz de apoyo $l=450$ mm, apoyada sobre rodillos capaces de girar sobre su propio eje e inclinarse. La carga se aplica a través de dos rodillos del mismo tipo, como se muestra en la Fig.9 y en la Fig.10.

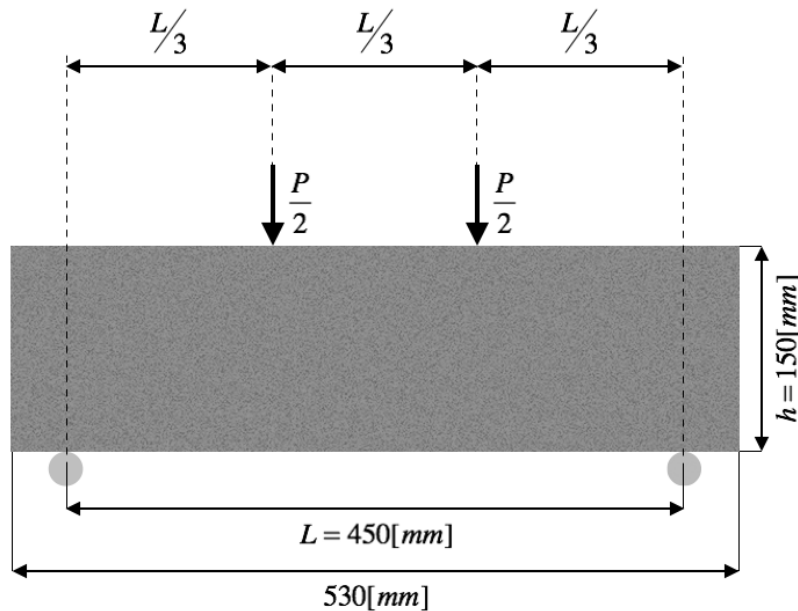


FIG.9: ESQUEMA ENSAYO ASTM C1609



FIG.10: EJECUCIÓN ENSAYO ASTM C1609

Equipamiento utilizado

Prensa de Ensayo

La prensa de ensayo posee un sistema de control por lazo cerrado. Este sistema permite controlar la velocidad de desplazamiento en el centro de la luz de la viga, haciendo que esta sea constante.

El sistema de carga y soporte de la probeta debe ser capaz de ejercer la carga a los tercios de la luz de la probeta, sin excentricidad ni torque alguno. Los rodillos deben rotar en su propio eje y la probeta no debe ser colocada de forma que restrinja su movimiento.

Transductor medidor de deflexión

Un transductor electrónico debe ser colocado con el fin de medir con precisión la deflexión neta en el centro de la luz de la viga.

Este transductor estará montado sobre un soporte que se encuentra unido a la viga y estará en contacto con una placa metálica, que mide el desplazamiento vertical en el centro de la luz de ensayo, como se muestra en la Fig.11.



FIG.11: TRANSDUCTOR MEDIDOR DE DEFLEXIÓN

Transductor medidor de apertura de fisura

De manera adicional a lo indicado en la norma, se mide la apertura de fisura, de este modo se podrá utilizar este parámetro en común con el método EN 14651 y poder relacionar los resultados de ambos ensayos.

Como se muestra en la Fig.12, en la cara inferior de la viga y dentro del tercio central de la luz de esta, se colocará un transductor en un soporte adherido a la probeta y en contacto con una placa metálica. El transductor mide la deformación que sufre la probeta a lo largo de su eje longitudinal.



FIG.12: TRANSDUCTOR MEDIDOR DE APERTURA DE FISURA

Sistema de registro de datos.

Los transductores mencionados anteriormente se encuentran conectados al sistema de control por lazo cerrado de la prensa de ensayo. Se registran los valores de carga aplicada,

deflexión y apertura de fisura, obteniendo como resultados las curvas Carga-Deflexión y Carga-COD.

Procedimiento

Al momento de realizar el ensayo, la probeta debe ser colocada sobre un costado en relación a la posición en que fue moldeada, así los rodillos de apoyo tendrán contacto con una superficie completamente lisa.

Durante el ensayo se debe controlar la velocidad de operación de la prensa, esto es, la razón de incremento de la deflexión neta a través del tiempo. Para deflexiones menores a $L/900$, la velocidad debe ser de 0,035 a 0,1 mm/min y para deflexiones mayores a $L/900$ esta debe ser de 0,05 a 0,3 mm/min. Estos incrementos deben hacerse a una razón no mayor a 0,05 mm/min y en intervalos de al menos 30 segundos.

El ensayo se da por finalizado al alcanzar una deflexión neta de 4,0 mm, sin embargo, en este caso al medirse la apertura de fisura, el ensayo se da por finalizado cuando se tiene un CMOD igual o mayor a 4,0 mm. Luego, la distancia de la grieta a cada uno de los puntos de apoyo, teniendo presente que si la grieta se produce fuera del tercio central, el ensayo debe ser descartado.

Ensayo según Norma EN 14651

Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas: Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (Límite de proporcionalidad (LOP), Resistencia Residual)

Especifica un método de determinación de la resistencia a la tracción por flexión del HRF mediante el ensayo de una viga con entalla, sometida a una carga central. Permite determinar el límite de proporcionalidad (LOP) y un conjunto de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión.

El comportamiento a tracción del HRF en términos de resistencia residual se evalúa mediante la curva *carga-deflexión* o mediante la curva *carga-CMOD*, al aplicar una carga puntual en el centro de la luz de una probeta prismática con entalla simplemente apoyada, como se muestra en la Ilustración 14.

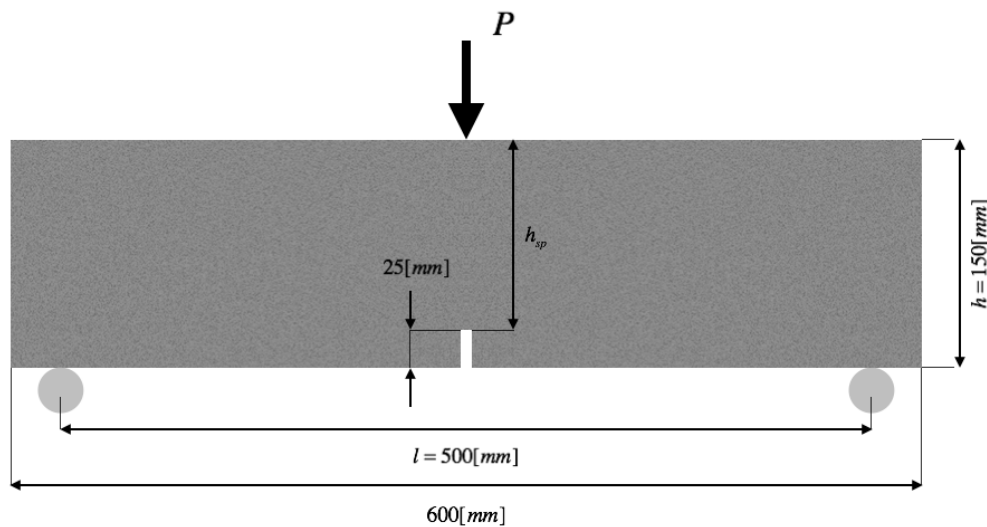


FIG.13: ESQUEMA ENSAYO EN14651.

Las probetas utilizadas corresponden a prismas con un tamaño de 150x150x600 mm. En este caso la longitud del vano o luz de ensayo corresponde a $l=500$ mm.

Previo al proceso de ensayo es necesario efectuar la *entalla* de las probetas, mediante el aserrado por vía húmeda. En la cara inferior de la probeta, siendo esta perfectamente lisa, debe aserrarse en dirección transversal, con una anchura menor o igual a 5 [mm] y una profundidad de 25 [mm]. La anchura de la entalla debe ser menor o igual a 5mm, y la profundidad de esta de 25 mm (Ver Ilustración 15).



FIG.14: ENTALLA PROBETAS EN14651.

Aparatos

- Sierra circular para entallar las probetas con una profundidad de corte fijo y una dirección de corte perpendicular al eje longitudinal de la probeta
- Máquina de ensayo, basada en las exigencias descritas en la Norma Europea EN 12390-4, cuyo funcionamiento pueda ser controlado, es decir, *con una velocidad de desplazamiento constante* y con una rigidez suficiente para evitar zonas inestables en la curva carga-CMOD o en la curva carga-deflexión.
- A su vez, la máquina de ensayo debe contar con el sistema de rodillos de apoyo que permitan transmitir la carga desde la máquina de ensayo a la probeta. Este sistema estará compuesto de dos rodillos de apoyo y uno de carga, como se muestra en la Ilustración 14 en los índices (1) y (2)
- Transductor medidor de apertura de fisura, que permita medir los desplazamientos con una precisión de 0,01 mm.
- Soporte en la base de la viga para adherir el transductor mencionado anteriormente.
- Sistema de registro de datos datos.

Procedimiento

Se coloca la probeta sobre los rodillos y se instala el transductor en su soporte. La máquina de ensayo controla la velocidad de crecimiento del CMOD y debe funcionar de manera que este aumente a velocidad constante de 0,05 mm/min. Cuando el CMOD sea igual a 0,1 mm, la velocidad debe ser de 0.2 mm/min. La norma establece que el ensayo debe finalizar cuando el valor de CMOD sea igual o superior a 4,0 [mm], sin embargo para lograr correlacionar los datos de este ensayo con el ensayo ASTM C1609, es necesario medir hasta alcanzar un valor de CMOD de 5,5 [mm]

En caso que el valor mínimo de la carga, en el rango comprendido entre $CMOD_{FL}$ (correspondiente al CMOD para el límite de proporcionalidad (LOP)) y $CMOD=0,5$ mm, sea inferior al 30% del valor de la carga correspondiente a $CMOD = 0,5$ mm, el procedimiento de ensayo se debe inspeccionar para localizar inestabilidades. Si la fisura se genera por fuera de la entalla, el ensayo debe rechazarse.

Capítulo 3. Programa Experimental

Materiales

Para la elaboración del hormigón se utiliza cemento, árido fino y árido grueso, agua, y aditivos. Dentro de los aspectos más importantes dentro de la elaboración es respetar la relación agua-cemento, de manera tal de asegurar el nivel de resistencia requerido y así un hormigón con alta durabilidad.

Cemento

El cemento utilizado en este estudio corresponde a un cemento puzolánico grado alta resistencia, Polpaico 400, cumpliendo con lo especificado en la norma NCh 148.

Áridos

Los agregados están compuestos por arena gruesa del río Aconcagua, cuya granulometría y propiedades se encuentran en la Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.

Granulometría Arena			
Tamiz	% Retenido	% Retenido Acum.	% Que Pasa
Nº4	11,2	11,2	88,8
Nº8	29,33	40,53	59,47
Nº16	17,11	57,64	42,36
Nº30	11,81	69,45	30,55
Nº50	17,92	87,37	12,63
Nº100	8,35	95,72	4,28
<100	4,28	100	0

TABLA 1: GRANULOMETRÍA ARENA

Propiedades del Árido	
Densidad Aparente Suelta	1695,05 kg/m ³
Densidad Compactada por percusión	1908,98 kg/m ³
Densidad Real Arido SSS	2518,80 kg/m ³
Densidad Real Arido Seco	2521,50 kg/m ³
Densidad Neta	2638,20 kg/m ³
Absorción de Agua	2,39 %
Finos por Lavado	6,30 %

TABLA 2: PROPIEDADES DEL ÁRIDO

Agua de Amasado

El agua utilizada corresponde a agua potable como lo establece la norma NCh 1498.

Agregados

Aditivos

Se utiliza un aditivo reductor de agua de alto rango, Sika Viscocrete-5100 CL , denominado superplastificante, utilizado con la finalidad de obtener una mayor trabajabilidad sin aumentar la relación agua-cemento, permitiendo obtener una mayor resistencia final, con una alta fluidez y cohesión

Actúa mediante diferentes mecanismos, como absorción superficial y efectos estéricos que separan las partículas de cemento, haciendo que el hormigón tenga propiedades como:

- Comportamiento autocompactante
- Alta fluidez en el tiempo
- Reducción de agua de un 30%
- Alta trabajabilidad
- Incremento de la resistencia inicial
- Mejora en el comportamiento en fluencia y tracción
- Reducción de la velocidad de carbonatación

No posee cloruros u otro compuesto que favorezca la corrosión, por lo que es compatible con el uso de fibras de acero.

En cuanto al modo de utilización, el fabricante indica el uso en dosis de 0,3 a 1,5% del peso del cemento y se aplica durante el mezclado del hormigón.

Fibras

Se utiliza fibra de acero Dramix 3D 65/35 BG, en dosis de 25 kg/m³ y 40 kg/m³. Corresponde a una fibra de acero de alambre estirado en frío y encoladas, recta con los extremos de ganchos (3D), con una esbeltez de 65, un largo de 35 mm y apariencia brillante. (Fig.15)



FIG.15: FIBRA UTILIZADA (DRAMIX 3D 65/35 BG)

A continuación se muestra la Tabla 3, donde se indican las propiedades de esta fibra:

Propiedades Fibra Dramix 3D 65/35 BG	
Propiedades del Material	
Resistencia a la tracción	1.345 N/mm ²
Módulo de Young	210.000 N/mm ²
Geometría	
Largo (<i>l</i>)	35 mm
Diámetro (<i>d</i>)	0,55 mm
Esbeltez (<i>l/d</i>)	65
Fibras por kg.	14531

TABLA 3: PROPIEDADES DE LA FIBRA

Dosificación

La dosificación del HRF que se utiliza corresponde a lo indicado en la Tabla 4:

Material	Dosificación	
Cemento (kg/m ³)	450	
Agua (lt/m ³)	210	
Arena (kg/m ³)	1700	
Aditivo Reductor de Agua (lt/m ³)	4,5	
Fibra de Acero 3D (kg/m ³)	25	40

TABLA 4: DOSIFICACIÓN INICIAL

Dadas las condiciones de la arena, por su humedad se realizan modificaciones durante el mezclado y correcciones por contenido de humedad y absorción de la arena. A su vez, se controla el uso de aditivo para conseguir una consistencia adecuada.

A continuación la Tabla 5, muestra la dosificación corregida:

Material	Dosificación Corregida	
Cemento (kg/m ³)	450	
Agua (lt/m ³)	170	
Arena (kg/m ³)	1760	
Aditivo Reductor de Agua (lt/m ³)	3,75	
Fibra de Acero 3D (kg/m ³)	25	40

TABLA 5: DOSIFICACIÓN CORREGIDA

Confección de Probetas

El hormigón se confecciona mediante el uso de un mezclador de carga vertical, con una capacidad máxima de 120 litros. Las probetas se confeccionaron realizando 9 amasadas. En algunas amasadas se hicieron paneles que se utilizan en otras investigaciones (Ver Fig.16)



FIG 16: CONFECCIÓN DE PROBETAS

En la Tabla 6 se muestra la cantidad de probetas elaboradas en cada amasada.

Cantidad de probetas fabricadas											
Probetas	Cantidad de fibra [kg/m ³]	Am. Nº1	Am. Nº2	Am. Nº3	Am. Nº4	Am. Nº5	Am. Nº6	Am. Nº7	Am. Nº8	Am. Nº9	Total
ASTM C1609	25	5	5	6	-	-	-	-	-	-	16
	40	-	-	-	4	1	5	-	-	-	10
EN 14651	25	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10
	40	-	-	-	-	3	2	5	-	-	10

TABLA 6: DETALLE AMASADAS

Al tratarse de una mezcla fluida la compactación se realiza de forma manual, mediante el uso de un pisón. La norma ASTM C31/C31 M establece que para vigas con un ancho de 150[mm] se debe compactar en 2 capas de igual volumen, con 1 golpe de pisón por capa cada 14 cm² de superficie de esa capa. Para la viga según se muestra en la norma ASTM C1609, con una superficie de 150 mm x 530 mm, se deben realizar 57 golpes de pisón por capa.

Para la viga descrita en el método EN 14651, con una superficie de 150 mm x 600 mm, se deben realizar 64 golpes de pisón por capa.

Se debe apisonar de manera uniforme sin tocar el fondo del molde y al realizarse en la capa superior es necesario penetrar en la capa inferior aproximadamente 25 mm. Posterior al apisonado se debe golpear los bordes del molde 10 a 15 veces para cerrar cualquier espacio o liberar burbujas de aire que puedan estar atrapadas en la mezcla. Finalmente se debe enrasar el molde para eliminar cualquier exceso de hormigón y obtener una superficie lisa.

Tras 72 horas, se procede a desmoldar las probetas y se inicia el proceso de curado. Para esto se almacenan en posición horizontal en un lugar donde no reciben luz del sol ni están expuestas a altas temperaturas. Luego se cubren con nylon para evitar la pérdida de agua y se riegan constantemente por un periodo de 28 días.

Para la identificación de cada probeta se utiliza la siguiente nomenclatura:

Para probetas basadas en la norma EN14651:

EN – 3D – 25 – (N° Ensayo)

EN – 3D – 40 – (N° Ensayo)

Para probetas basadas en la norma ASTM C1609:

ASTM – 3D – 25 – (N° Ensayo)

ASTM – 3D – 40 – (N° Ensayo)

Las especímenes que fueron sometidos a ensayos y arrojaron resultados correctos corresponde a los mostrados en la Tabla 7.

Identificación Probetas Ensayos ASTM C1609 y EN 14651			
HRF-25		HRF-40	
ASTM C1609	EN 14651	ASTM C1609	EN 14651
ASTM-3D-25-(6)	EN-3D-25-(12)	ASTM-3D-40-(17)	EN-3D-40-(1)
ASTM-3D-25-(7)	EN-3D-25-(13)	ASTM-3D-40-(18)	EN-3D-40-(2)
ASTM-3D-25-(22)	EN-3D-25-(14)	ASTM-3D-40-(19)	EN-3D-40-(3)
-	EN-3D-25-(15)	ASTM-3D-40-(20)	EN-3D-40-(4)
-	EN-3D-25-(16)	-	EN-3D-40-(5)
-	EN-3D-25-(17)	-	EN-3D-40-(6)
-	EN-3D-25-(18)	-	EN-3D-40-(7)
-	EN-3D-25-(19)	-	EN-3D-40-(8)
-	EN-3D-25-(20)	-	EN-3D-40-(9)

TABLA 7: IDENTIFICACIÓN PROBETAS HRF-25, HRF-40

Capítulo 4. Resultados y Análisis

Corrección de las Mediciones

Método ASTM C1609

A diferencia de lo descrito en la norma EN14651, en el método según norma ASTM C1609, las probetas no poseen entalla, lo que produce que la grieta no se origine necesariamente en el centro de la luz de la viga. Este efecto está representado por la excentricidad (e), como se muestra en la Fig.18. Esto produce que la deflexión registrada por los aparatos, medida en el centro de esta, no sea una representación correcta de la deflexión real experimentada por la probeta. (Ver Fig.17).

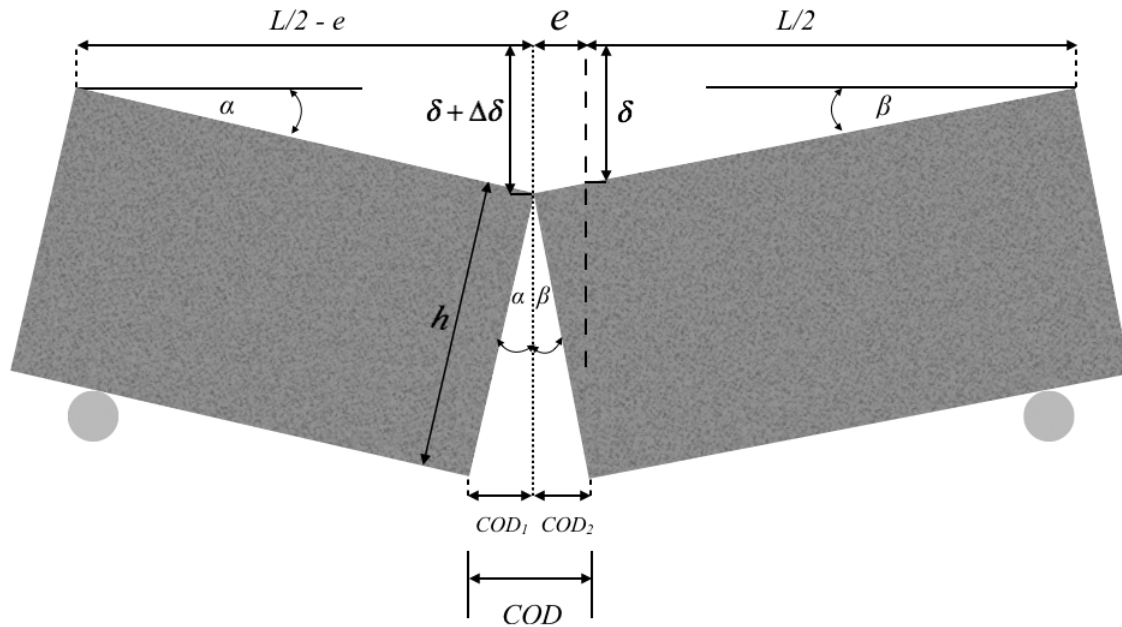


FIG.17: REPRESENTACIÓN PARÁMETROS DE ENSAYO ASTM C1609

Para determinar la deflexión real experimentada por la probeta se debe medir la distancia de la grieta a cada borde, para encontrar el punto exacto donde esta se origina. Así se puede determinar el valor de la excentricidad (e), esto es, la distancia de la grieta al centro de la luz de ensayo.

$$Deflexión.neta = \delta + \Delta\delta$$

Se sabe además que:

$$\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} + e} = \frac{\delta}{\frac{l}{2}}$$

$$\text{Deflexión.neta} = \delta + \Delta\delta = \frac{\frac{l}{2} + e}{\frac{l}{2}} \cdot \delta$$

En seguida, se debe determinar el valor de la apertura de fisura COD. Dado que el transductor al estar ubicado en la cara inferior de la probeta, efectúa la medición con la misma inclinación, entregando un resultado alterado, que es corregido como sigue:

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} - e}$$

Dado que α es un ángulo pequeño se tiene que: $\text{sen}(\alpha) \approx \alpha$, luego:

$$\alpha = \frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} - e}$$

Se calcula el valor corregido de COD:

$$\begin{aligned} \text{COD}_c &= \text{COD}_0 \cdot \cos(\alpha) \\ \text{COD}_c &= \text{COD}_0 \cdot \cos\left(\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} - e}\right) \end{aligned}$$

Dado que la línea de medición se encuentra a una distancia “y” por debajo de la cara inferior de la probeta, COD debe ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$\text{COD} = \text{COD}_c \cdot \frac{h}{h + y}$$

donde h corresponde a la altura de la probeta. Se tiene entonces:

$$\text{COD} = \text{COD}_0 \cdot \cos\left(\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} - e}\right) \cdot \frac{150}{170}$$

Método EN 14651

Para comenzar, es necesario corregir el valor de apertura de fisura CMOD, dado que el transductor se ubica a una distancia "y" por debajo de la parte inferior de la probeta, como se muestra en la Fig.18.

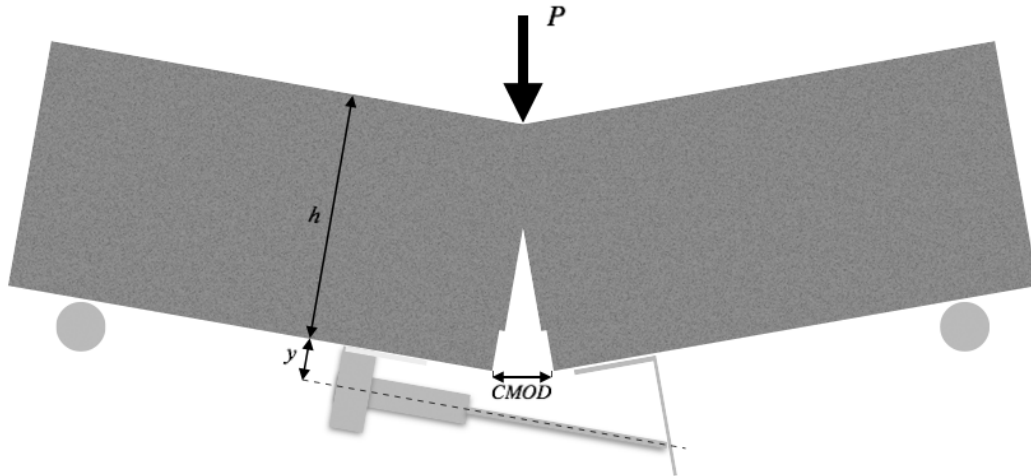


FIG.18: REPRESENTACIÓN PARÁMETROS DE ENSAYO EN14651

El valor de CMOD debe obtenerse a partir del valor medido $CMOD_y$, mediante la siguiente expresión:

$$CMOD = CMOD_y \cdot \frac{h}{h+y}$$

donde h corresponde a la altura total de la probeta. Se tiene entonces:

$$CMOD = CMOD_y \cdot \frac{150}{170}$$

Resultados

A continuación en la Fig.19 y Fig.20 se muestran los resultados correspondiente a las curvas Carga-Deflexión y Carga-COD para el método ASTM C1609 y Carga-CMOD para EN 14651.

Resultados Ensayos ASTM C1609

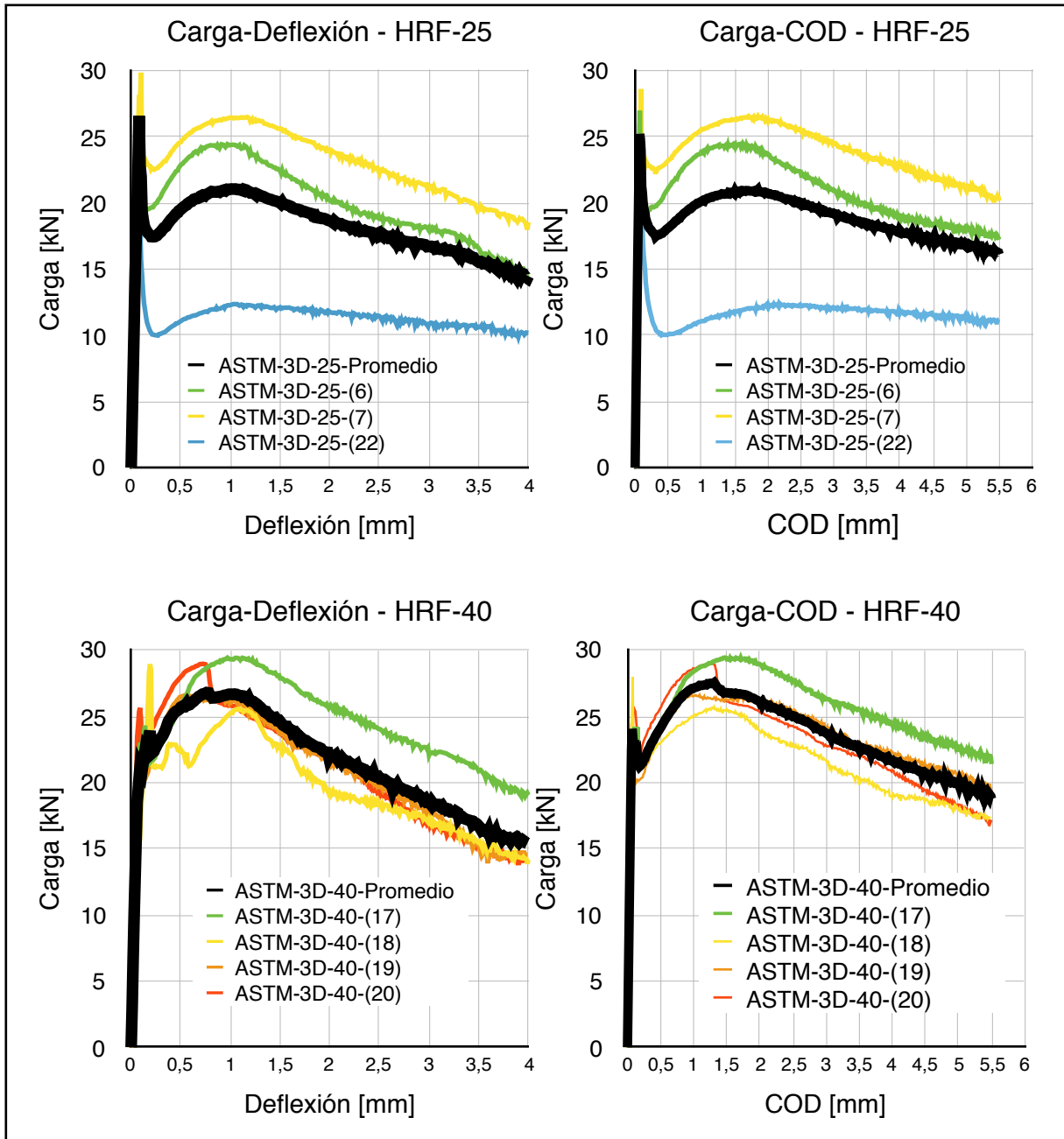


FIG.19: RESULTADOS ASTM C1609. CURVAS CARGA-DEFLEXIÓN, CARGA-COD

Resultados Ensayo EN 14651

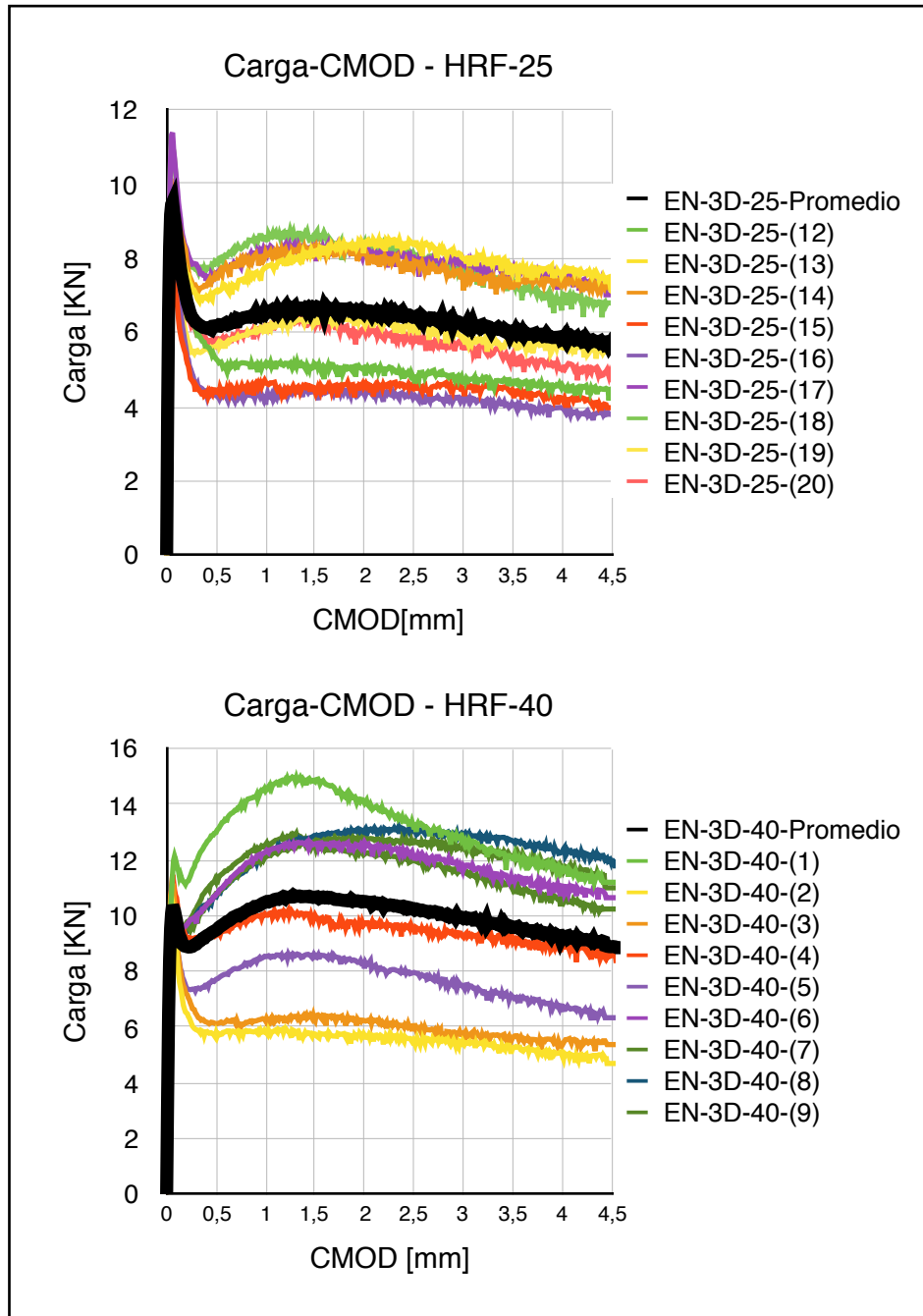


FIG.20: RESULTADOS EN14651. CURVAS CARGA-CMOD

Análisis de Resultados y Equivalencia.

Análisis Método ASTM C1609

Para encontrar una equivalencia entre las resistencias residuales de ambos ensayos, se utiliza la apertura de fisura como parámetro en común, puesto que para ambos métodos, los esfuerzos en función de la apertura son proporcionales entre sí. En el caso del método ASTM C1609, se debe encontrar una relación que permita estimar la apertura de fisura a partir de la deflexión. Se presenta el esquema de la Fig.21, donde se muestra un modelo para el análisis.

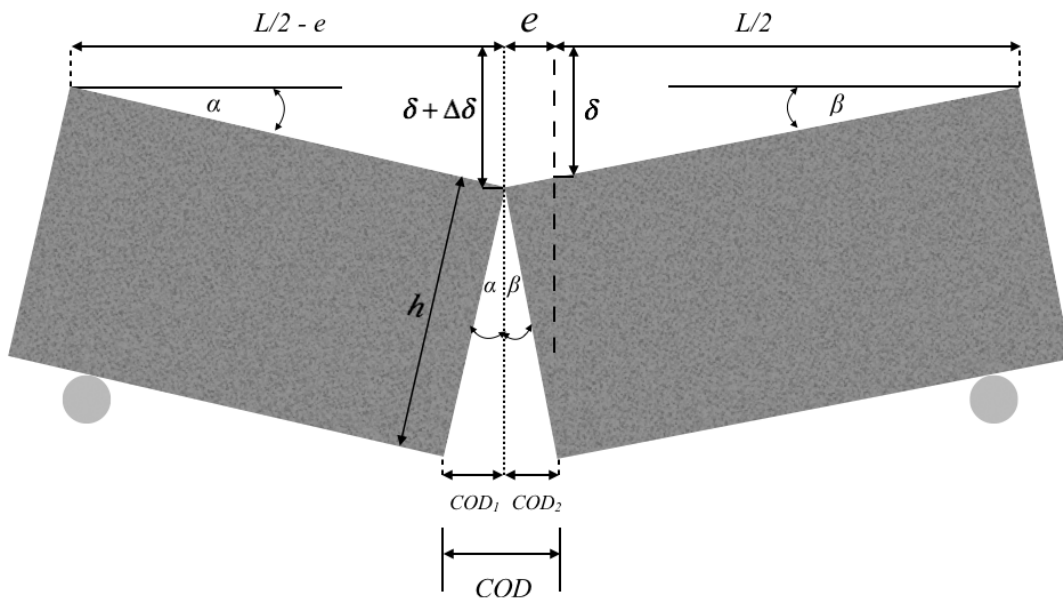


FIG.21: MODELO SIMPLIFICADO AGRIETAMIENTO (ASTM C1609)

Para ángulos pequeños se tiene:

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} - e} \approx \alpha$$

$$\text{sen}(\beta) = \frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} + e} \approx \beta$$

Por otra parte, las dimensiones de la grieta están determinadas por los ángulos α y β .

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{COD_1}{h} \approx \alpha$$

$$\text{sen}(\beta) = \frac{COD_2}{h} = \beta$$

Reemplazando las expresiones anteriores se tiene:

$$COD_1 = \left(\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} - e} \right) \cdot h$$

$$COD_2 = \left(\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} + e} \right) \cdot h$$

$$COD = COD_1 + COD_2 = \left(\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} - e} \right) \cdot h + \left(\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} + e} \right) \cdot h$$

$$COD = (\delta + \Delta\delta) \cdot h \cdot \left[\frac{1}{\frac{l}{2} - e} + \frac{1}{\frac{l}{2} + e} \right]$$

$$COD = \frac{(\delta + \Delta\delta)}{\left(\frac{l}{2} - e \right) \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)} \cdot h \cdot \left[\frac{l}{2} - e + \frac{l}{2} + e \right]$$

$$COD = \frac{(\delta + \Delta\delta)}{\left(\frac{l}{2} - e \right) \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)} \cdot h \cdot l$$

Se tiene además:

$$\frac{\delta + \Delta\delta}{\frac{l}{2} + e} = \frac{\delta}{\frac{l}{2}}$$

$$\delta + \Delta\delta = \frac{\delta}{\frac{l}{2}} \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)$$

$$COD = \frac{\frac{\delta}{\frac{l}{2}} \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)}{\left(\frac{l}{2} - e \right) \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)} \cdot h \cdot l$$

$$COD = \frac{2\delta h}{\left(\frac{l}{2} - e \right)}$$

Se sabe que $l = 3h$

$$COD = \frac{4\delta h}{(3h - 2e)}$$

Luego:

$$w = \frac{COD}{2} = \frac{2\delta h}{(3h - 2e)}$$

Ecuación N°1: Estimación de w en función de la deflexión

Sin embargo se debe tener presente que el agrietamiento se produce de forma progresiva a través de la altura h de la viga. Se considera que la sección no agrietada está determinada por la altura x , correspondiente a la profundidad del eje neutro (Ver Fig.22)

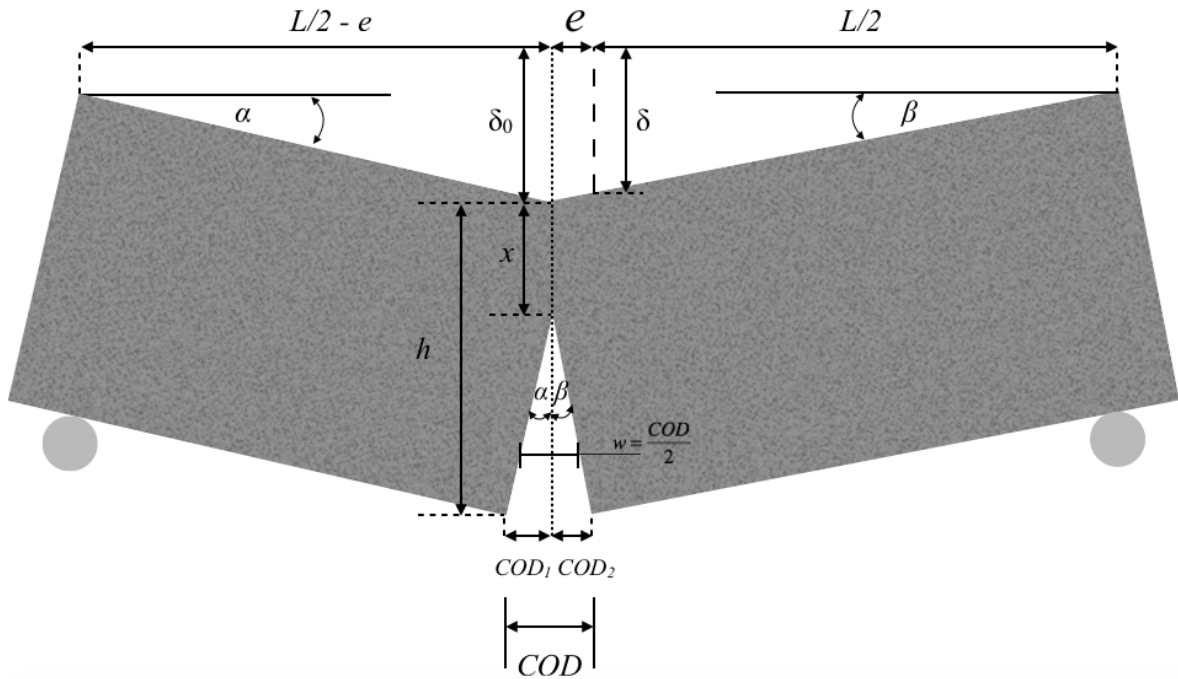


FIG.22: MODELO ASTM C1609 (AGRIETAMIENTO PROGRESIVO)

Para determinar el valor de x , se debe analizar el diagrama de esfuerzos de la viga sometida a flexión de la Fig.23.

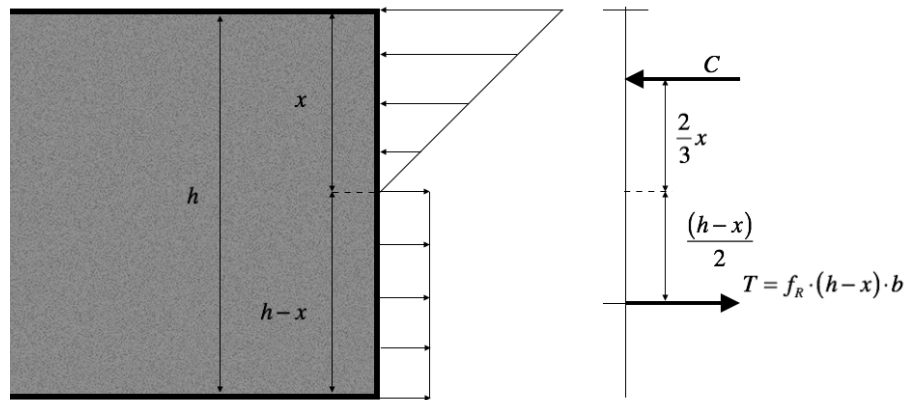


FIG.23: DIAGRAMA DE ESFUERZOS ASTM C1609

A partir de este diagrama se tiene se obtiene la *Ecuación N°2*: Esfuerzos Reales (1) ASTM C1609, como se desarrolla a continuación:

$$T = f_R \cdot (h - x) \cdot b$$

$$M = T \cdot \left(\frac{h-x}{2} + \frac{2x}{3} \right)$$

$$M = F_R \cdot (h-x) \cdot b \cdot \left(\frac{3h+x}{6} \right)$$

$$f_R = \frac{6 \cdot M}{(h-x) \cdot (3h+x) \cdot b} = \frac{6 \cdot \left(\frac{P \cdot l}{6} \right)}{(h-x) \cdot (3h+x) \cdot b}$$

$$f_R = \frac{P \cdot l}{(h-x) \cdot (3h+x) \cdot b}$$

Ecuación N°2: Esfuerzos Reales(1) ASTM C1609

Luego, con equilibrio de esfuerzos se tiene:

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_C \cdot x \cdot b = f_R \cdot (h-x) \cdot b$$

$$f_R = \frac{\sigma_C \cdot x}{2 \cdot (h-x)}$$

$$\sigma_C = \varepsilon_C \cdot E_C$$

$$f_R = \frac{\varepsilon_C \cdot E_C \cdot x}{2 \cdot (h-x)}$$

$$\varepsilon_C = \frac{w \cdot x}{(h-x)^2}$$

$$f_R = \frac{w \cdot E_C \cdot x^2}{2 \cdot (h-x)^3}$$

Ecuación N°3: Esfuerzos Reales (2) ASTM C1609

Al igualar los términos se tiene lo siguiente:

$$f_R = \frac{w \cdot E_C \cdot x^2}{2 \cdot (h-x)^3} = \frac{P \cdot l}{(h-x) \cdot (3h+x) \cdot b}$$

$$\frac{x^2 \cdot (h-x) \cdot (3h+x)}{(h-x)^3} = \frac{2 \cdot P \cdot l}{w \cdot E_C \cdot b}$$

$$\frac{x^2 \cdot (3h+x)}{(h-x)^2} = \frac{2 \cdot P \cdot l}{w \cdot E_C \cdot b}$$

Ecuación N°4: Cálculo de $x=f(w)$ (ASTM C1609)

Mediante la Ecuación N°4 se puede determinar el valor de x para cada w . En la Fig.24 se muestra la relación entre ambas variables y además se puede observar un agrietamiento levemente más controlado para una cuantía de fibras de 40 kg/m³, dada la mayor cantidad de fibras actuando en la sección no agrietada durante el ensayo.

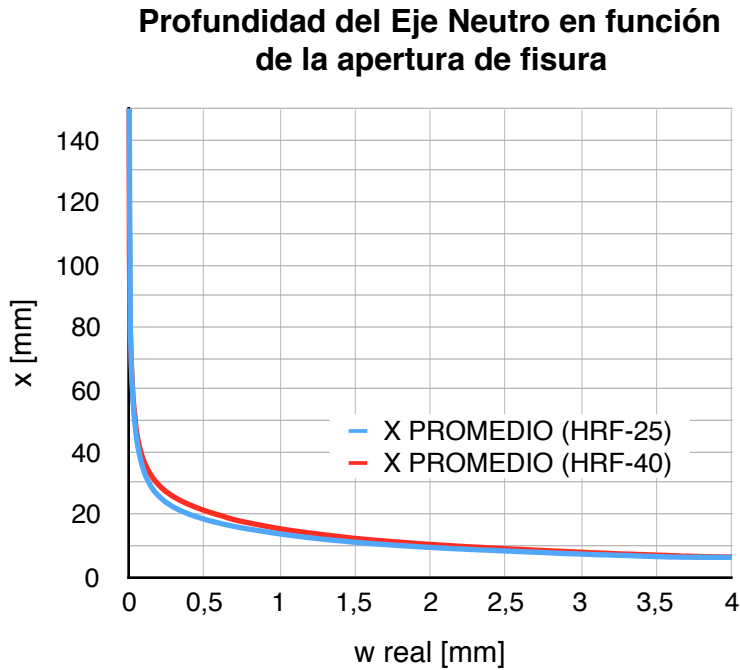


FIG.24: ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDAD DE EJE NEUTRO ($x(x=f(w))$) (ASTM C1609)

Al conocer el valor de x , se puede estimar el valor de la apertura como sigue:

$$\text{sen}(\alpha) \approx \alpha = \frac{\delta_0}{\frac{l}{2} - e}$$

$$\text{sen}(\beta) \approx \beta = \frac{\delta_0}{\frac{l}{2} + e}$$

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{COD_1}{(h-x)}$$

$$\text{sen}(\beta) = \frac{COD_2}{(h-x)}$$

Igualando términos se tiene:

$$COD_1 = \left(\frac{\delta_0}{\frac{l}{2} - e} \right) \cdot (h - x)$$

$$COD_2 = \left(\frac{\delta_0}{\frac{l}{2} + e} \right) \cdot (h - x)$$

$$COD = COD_1 + COD_2 = \left(\frac{\delta_0}{\frac{l}{2} - e} \right) \cdot (h - x) + \left(\frac{\delta_0}{\frac{l}{2} + e} \right) \cdot (h - x)$$

$$COD = (\delta_0) \cdot (h - x) \cdot \left[\frac{1}{\frac{l}{2} - e} + \frac{1}{\frac{l}{2} + e} \right]$$

$$COD = \frac{(\delta_0)}{\left(\frac{l}{2} - e \right) \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)} \cdot (h - x) \cdot \left[\frac{l}{2} - e + \frac{l}{2} + e \right]$$

$$COD = \frac{(\delta_0)}{\left(\frac{l}{2} - e \right) \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)} \cdot (h - x) \cdot l$$

Se sabe además a partir del esquema mostrado en la Fig.22:

$$\frac{\delta_0}{\frac{l}{2} + e} = \frac{\delta}{\frac{l}{2}}$$

$$\delta_0 = \frac{\delta}{l} \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)$$

$$COD = \frac{\frac{\delta}{l} \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)}{\left(\frac{l}{2} - e \right) \cdot \left(\frac{l}{2} + e \right)} \cdot (h-x) \cdot l$$

$$COD = \frac{2\delta \cdot (h-x)}{\left(\frac{l}{2} - e \right)}$$

Se sabe que $l = 3h$

$$COD = \frac{4\delta \cdot (h-x)}{(3h-2e)}$$

Luego:

$$w = \frac{COD}{2} = \frac{2\delta \cdot (h-x)}{(3h-2e)}$$

Ecuación N°5: Estimación de w a partir de la deflexión y "x"

Utilizando la *Ecuación N°1* y la *Ecuación N°5* se gráfica la relación entre w estimado (w_d ; $w_{d,x}$) y w real (medido en base a COD). (Fig.25 y Fig.26)

W Estimado ASTM C1609 - HRF-25

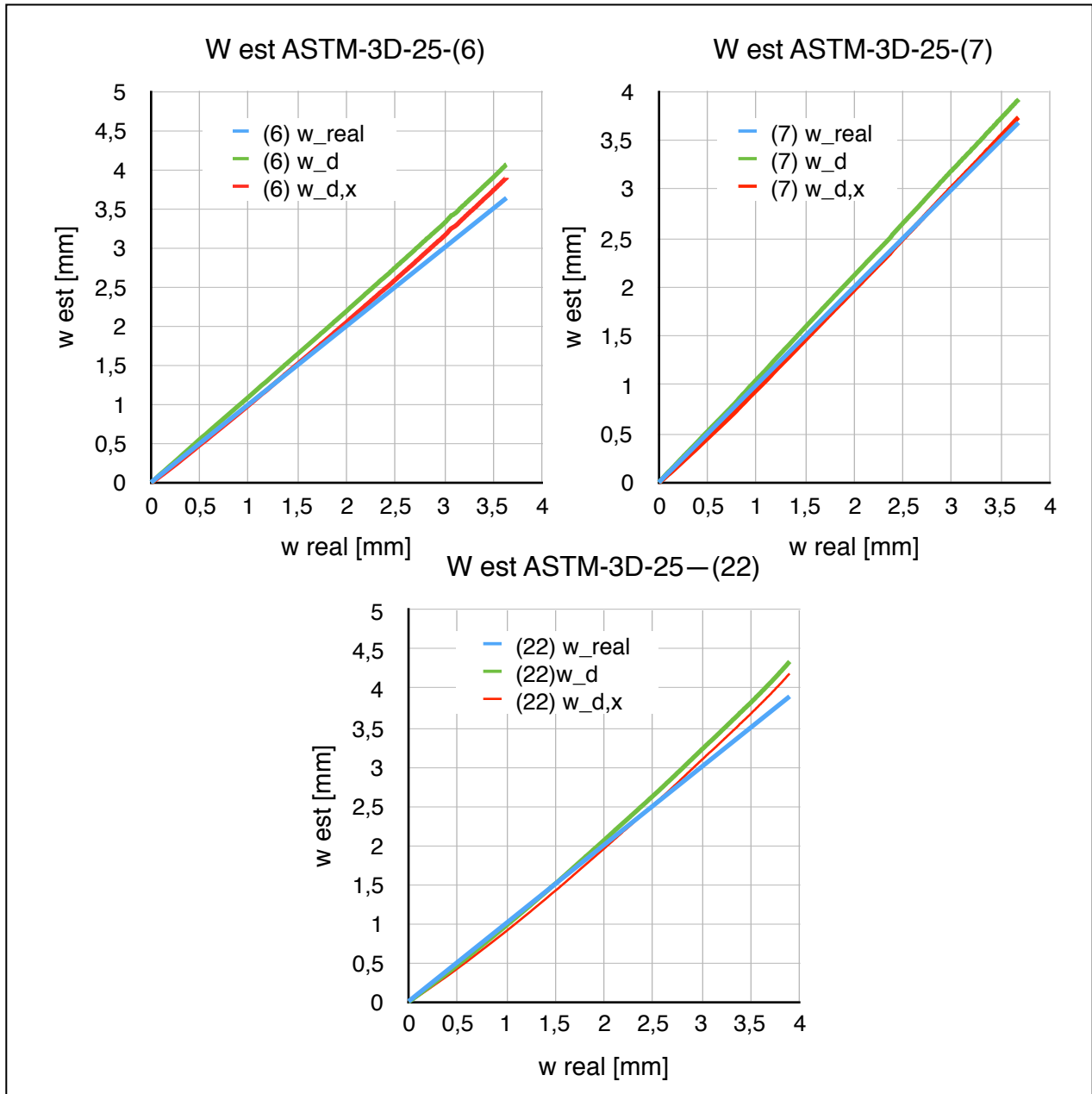


FIG.25: W EST V/S W REAL (HRF-25)

W Estimado ASTM C1609 - HRF-40

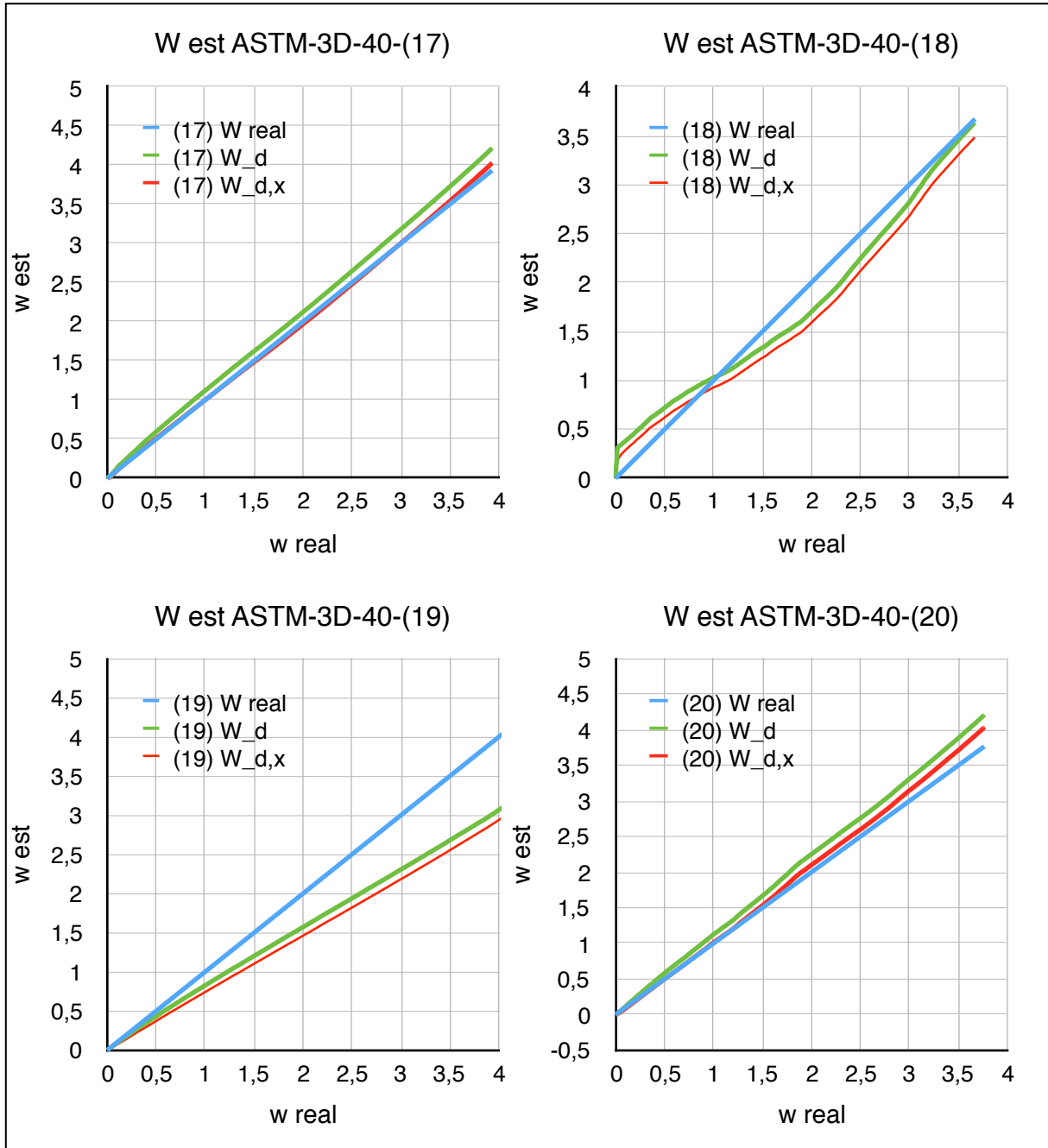


FIG.26: W EST V/S W REAL (HRF-40)

A continuación, en la Fig.27, se muestra la relación entre w_{est} (w_d , $w_{d,x}$) y w_{real} calculado como valor promedio para cada dosis y la diferencia entre los valores estimados y el valor real. Se tienen diferencias menores al 30% entre el valor real y el estimado, dentro del rango de interés, esto es, $0,2 < w < 2,5$ mm, por lo que la relación descrita en la Ecuación N°5 se considera una buena estimación.

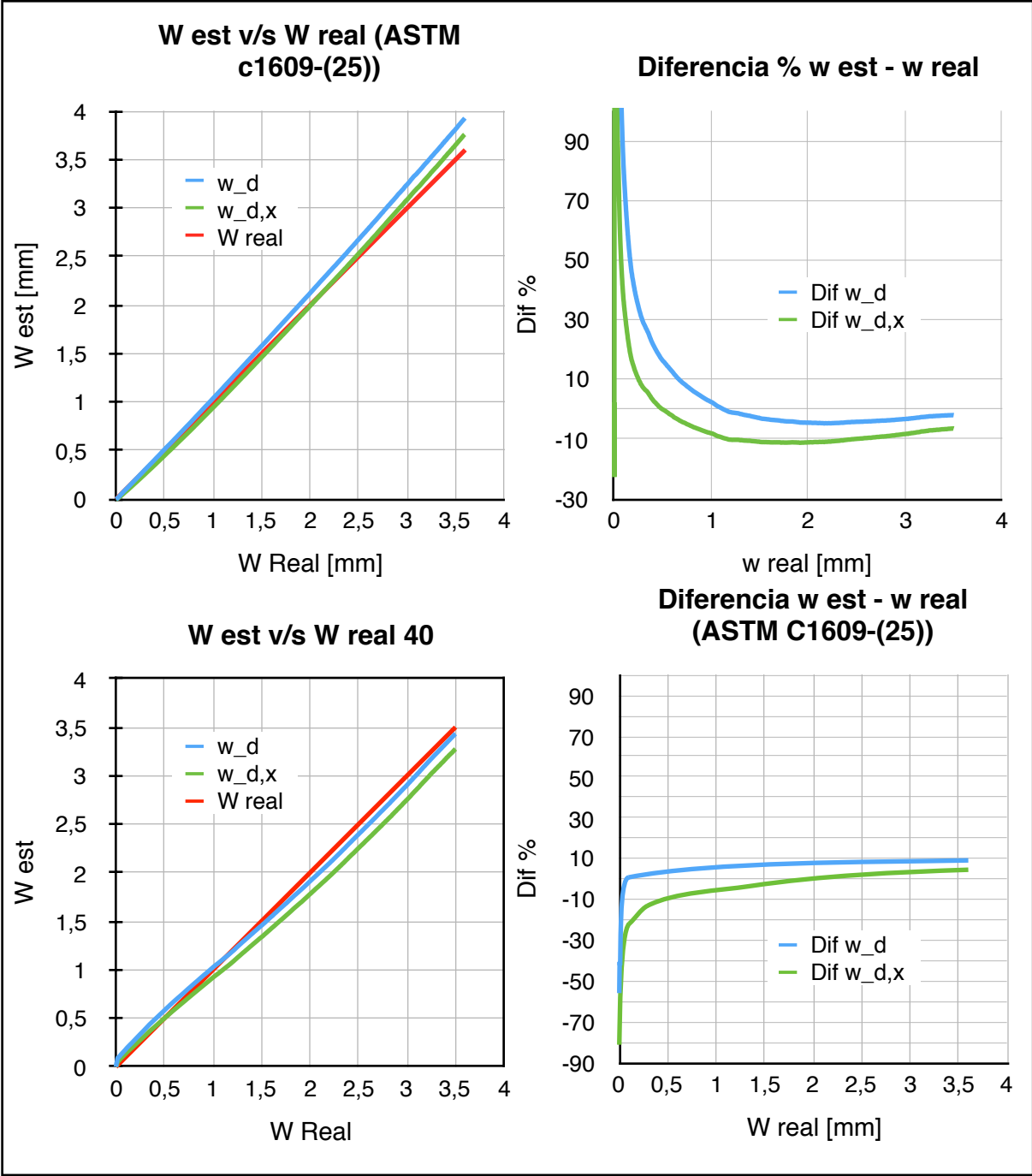


FIG.27: RELACIÓN W EST- W REAL (PROMEDIO) Y DIFERENCIA EST-REAL

Análisis Método EN 14651

Para encontrar la correlación entre los ensayos de flexión mencionados, es necesario encontrar el valor de w , para posteriormente calcular los valores de esfuerzo. En la Fig.28 se muestra el esquema del ensayo.

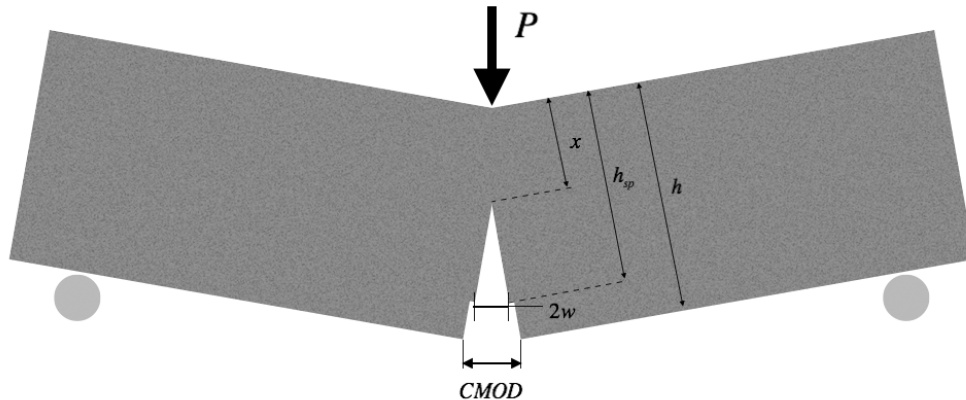


FIG.28: MODELO EN 14651

A partir de este esquema se puede obtener la siguiente relación:

$$\frac{CMOD}{h-x} = \frac{2w}{h_{sp}-x}$$

$$w = \frac{(h_{sp}-x)}{2 \cdot (h-x)} \cdot CMOD$$

Ecuación N°6: w ensayo EN 14651

Para determinar el valor de x , se realiza el mismo análisis que en el caso de la norma ASTM. En la Fig.29 se muestra el diagrama de esfuerzos de la viga EN 14651.

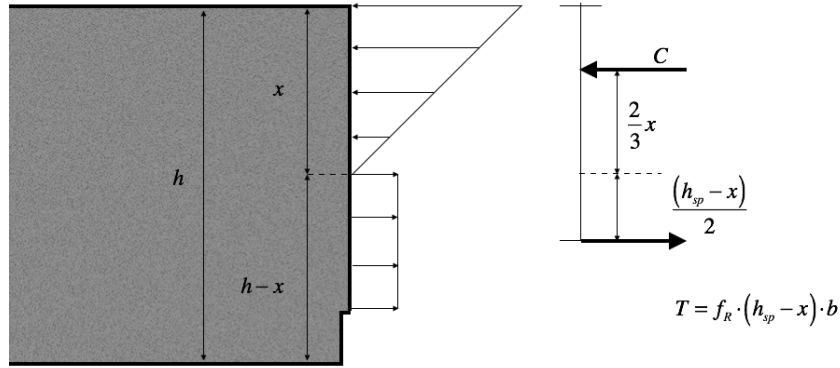


FIG.29: DIAGRAMA ESFUERZOS EN14651

$$T = f_R \cdot (h_{sp} - x) \cdot b$$

$$M = T \cdot \left(\frac{h_{sp} - x}{2} + \frac{2x}{3} \right)$$

$$M = F_R \cdot (h_{sp} - x) \cdot b \cdot \left(\frac{3h_{sp} + x}{6} \right)$$

$$f_R = \frac{M}{(h_{sp} - x) \cdot \left(\frac{h_{sp}}{2} + \frac{x}{6} \right) \cdot b} = \frac{(P \cdot l / 4)}{(h_{sp} - x) \cdot \left(\frac{h_{sp}}{2} + \frac{x}{6} \right) \cdot b}$$

$$f_R = \frac{P \cdot l / 4}{(h_{sp} - x) \cdot \left(\frac{h_{sp}}{2} + \frac{x}{6} \right) \cdot b}$$

Ecuación N°7: Esfuerzos Reales (1) EN 14651

Luego Igualando esfuerzos se tiene:

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot x \cdot b = f_R \cdot (h_{sp} - x) \cdot b$$

$$f_R = \frac{\sigma_c \cdot x}{2 \cdot (h_{sp} - x)}$$

$$\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_c$$

$$f_R = \frac{\varepsilon_c \cdot E_c \cdot x}{2 \cdot (h_{sp} - x)}$$

$$\varepsilon_c = \frac{w \cdot x}{(h_{sp} - x)^2}$$

$$f_R = \frac{w \cdot E_C \cdot x^2}{2 \cdot (h_{sp} - x)^3}$$

Ecuación N°8: Esfuerzos Reales (2) EN 14651

Igualando términos se tiene la siguiente expresión que permite determinar el valor de x en función de la apertura.

$$f_R = \frac{w \cdot E_C \cdot x^2}{2 \cdot (h_{sp} - x)^3} = \frac{P \cdot l / 4}{(h_{sp} - x) \cdot \left(\frac{h_{sp}}{2} + \frac{x}{6}\right) \cdot b}$$

$$\frac{x^2 \cdot (h_{sp} - x) \cdot \left(\frac{h_{sp}}{2} + \frac{x}{6}\right)}{(h_{sp} - x)^3} = \frac{P \cdot l}{2 \cdot w \cdot E_C \cdot b}$$

$$\frac{x^2 \cdot \left(\frac{h_{sp}}{2} + \frac{x}{6}\right)}{(h_{sp} - x)^2} = \frac{2 \cdot P \cdot l}{w \cdot E_C \cdot b}$$

Ecuación N°9: Cálculo de $x=f(w)$ (EN 14651)

En la Fig.30 se muestra la relación entre ambas variables y al igual que en el caso ASTM, se puede observar un agrietamiento levemente mas controlado para una cuantía de fibras de 40 kg/m³, por una mayor presencia de fibras en la sección no agrietada.

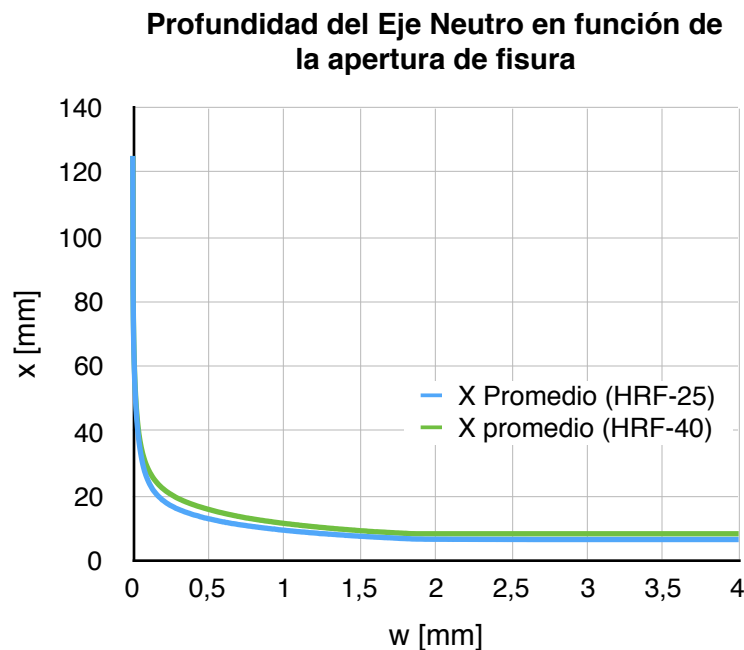


FIG.30: ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDAD DEL EJE NEUTRO (($X=F(W)$) (EN 14651))

Equivalencia entre las resistencias residuales calculadas mediante los ensayos ASTM C1609 y EN14651.

Para determinar la equivalencia entre las resistencias residuales descritas en ambos métodos mencionados, es necesario calcular los esfuerzos reales y normalizados para cada método y para cada dosificación de fibras.

Metodo ASTM C1609

Esfuerzos Reales

$$f_{Real} = \frac{P \cdot l}{(h - x) \cdot (3h + x) \cdot b}$$

$$f_{Real} = \frac{w \cdot E_c \cdot x^2}{2 \cdot (h - x)^3}$$

Esfuerzos Normalizados

$$f_{norm} = \frac{Pl}{bh^2}$$

Método EN 14651

Esfuerzos Reales

$$f_{Real} = \frac{P \cdot l / 4}{(h_{sp} - x) \cdot \left(\frac{h_{sp}}{2} + \frac{x}{6} \right) \cdot b}$$

$$f_{Real} = \frac{w \cdot E_c \cdot x^2}{2 \cdot (h_{sp} - x)^3}$$

Esfuerzos Normalizados

$$f_{norm} = \frac{3Pl}{2bh^2}$$

FIG.31: FÓRMULAS ESFUERZOS REALES Y NORMALIZADOS ASTM C1609, EN14651.

Utilizando las formulas indicadas en la Fig.31, se obtienen los gráficos que se muestran en la Fig. 32 para el HRF-25 y Fig. 33 para HRF-40.

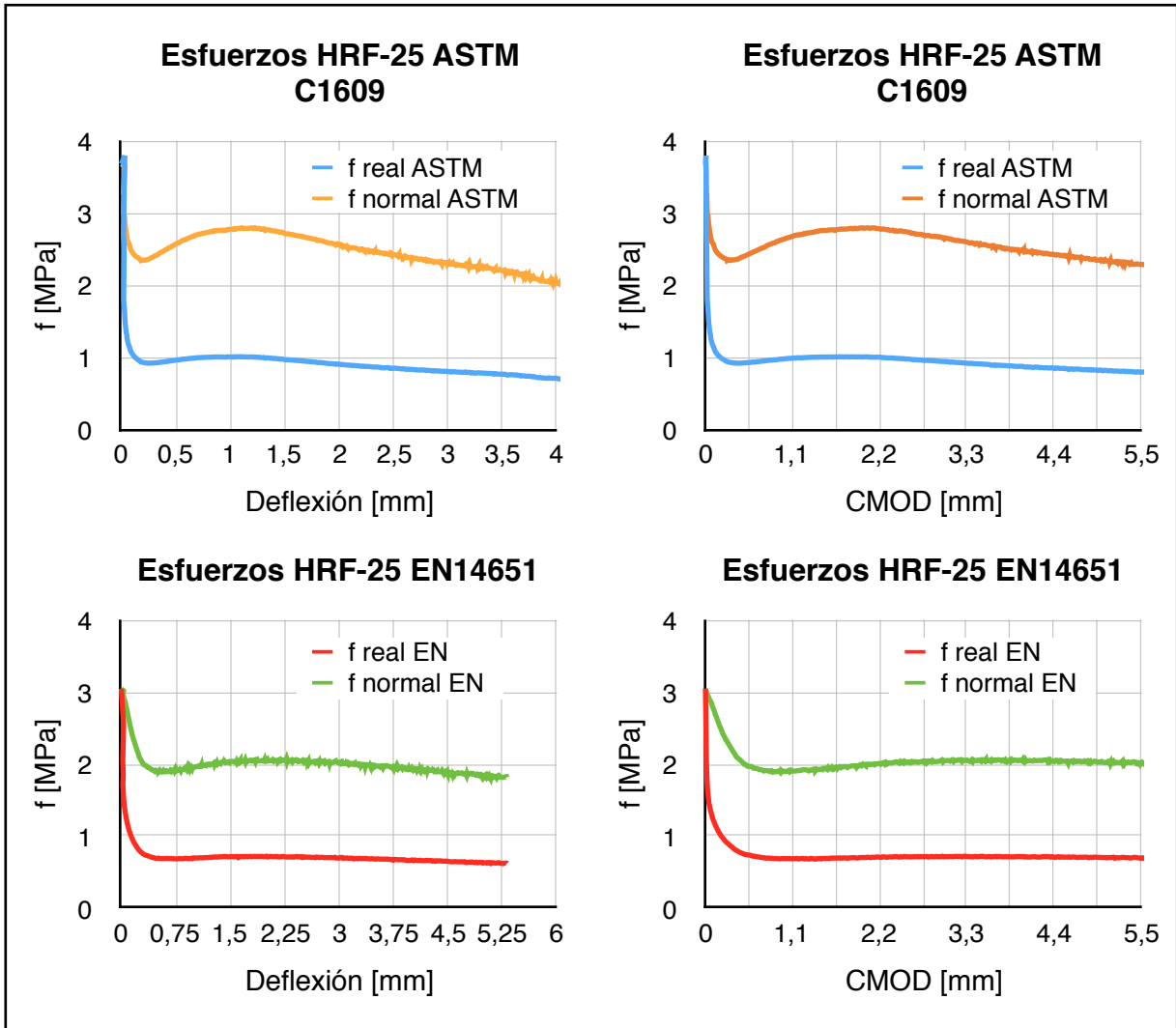


FIG.32: ESFUERZOS HRF-25 ASTM C1609, EN14651.

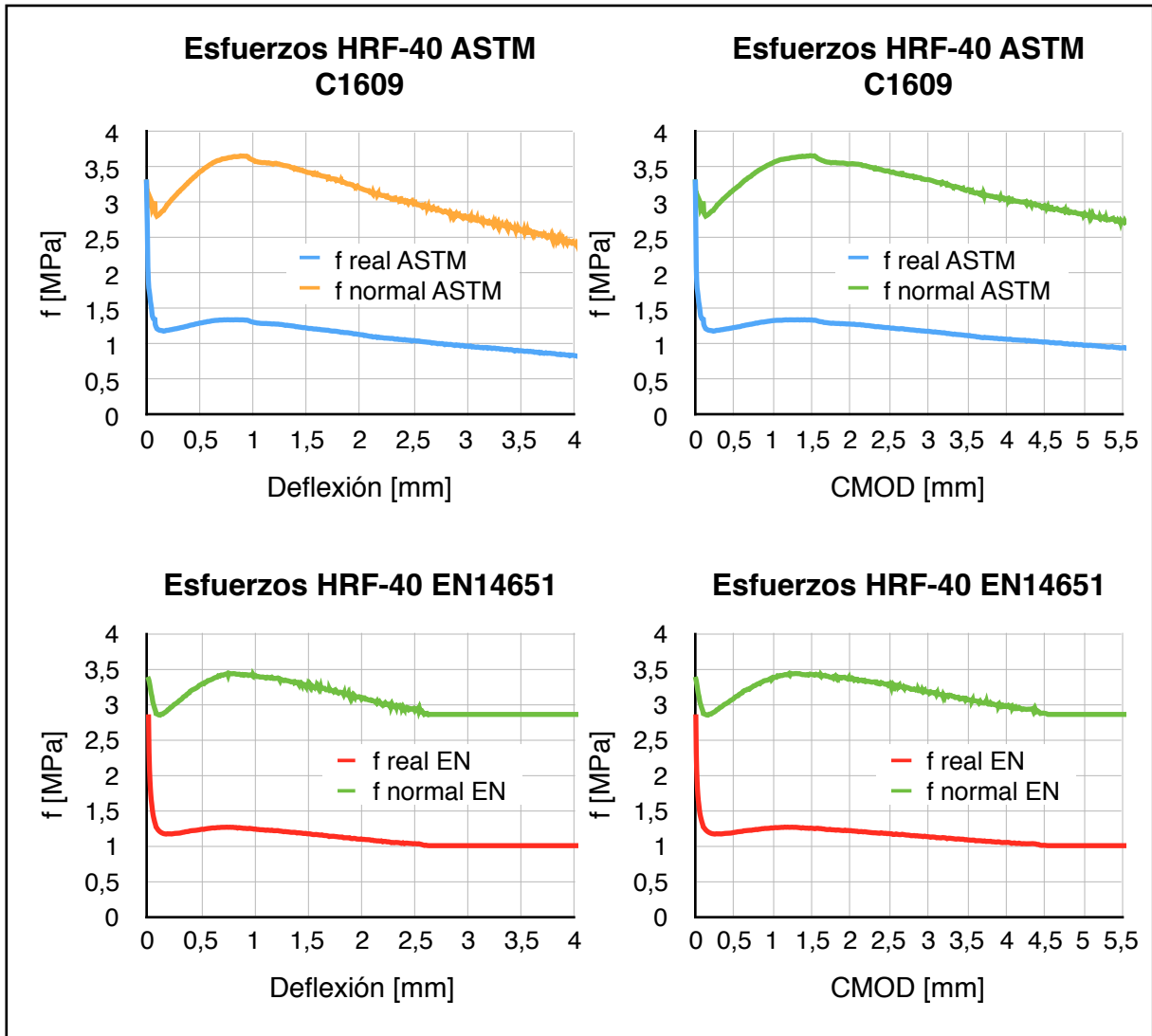


FIG.33: ESFUERZOS HRF-40 ASTM C1609, EN 14651

Como se observa en la Fig.32 y Fig.33, los esfuerzos normalizados son considerablemente mayores a los esfuerzos reales. Es por esta razón, muy importante conocer los valores reales de esfuerzos para caracterizar de mejor manera el HRF y su resistencia.

Para determinar la correlación entre los ensayos se debe determinar una equivalencia entre esfuerzos reales y entre esfuerzos normalizados para ambos métodos.

Para establecer esta relación entre los esfuerzos, se calculan los siguiente coeficientes:

$$k_{real} = \frac{f_{real} EN}{f_{real} ASTM}$$

Ecuación N°10: Coeficiente Correlación Esfuerzos Reales k_{real}

$$k_{normal} = \frac{f_{normal} EN}{f_{normal} ASTM}$$

Ecuación N°11: Coeficiente Correlación Esfuerzos Normalizados k_{normal}

Utilizando la *Ecuación N°10* y *N°11* se obtienen los gráficos de la Fig.34 y 35.

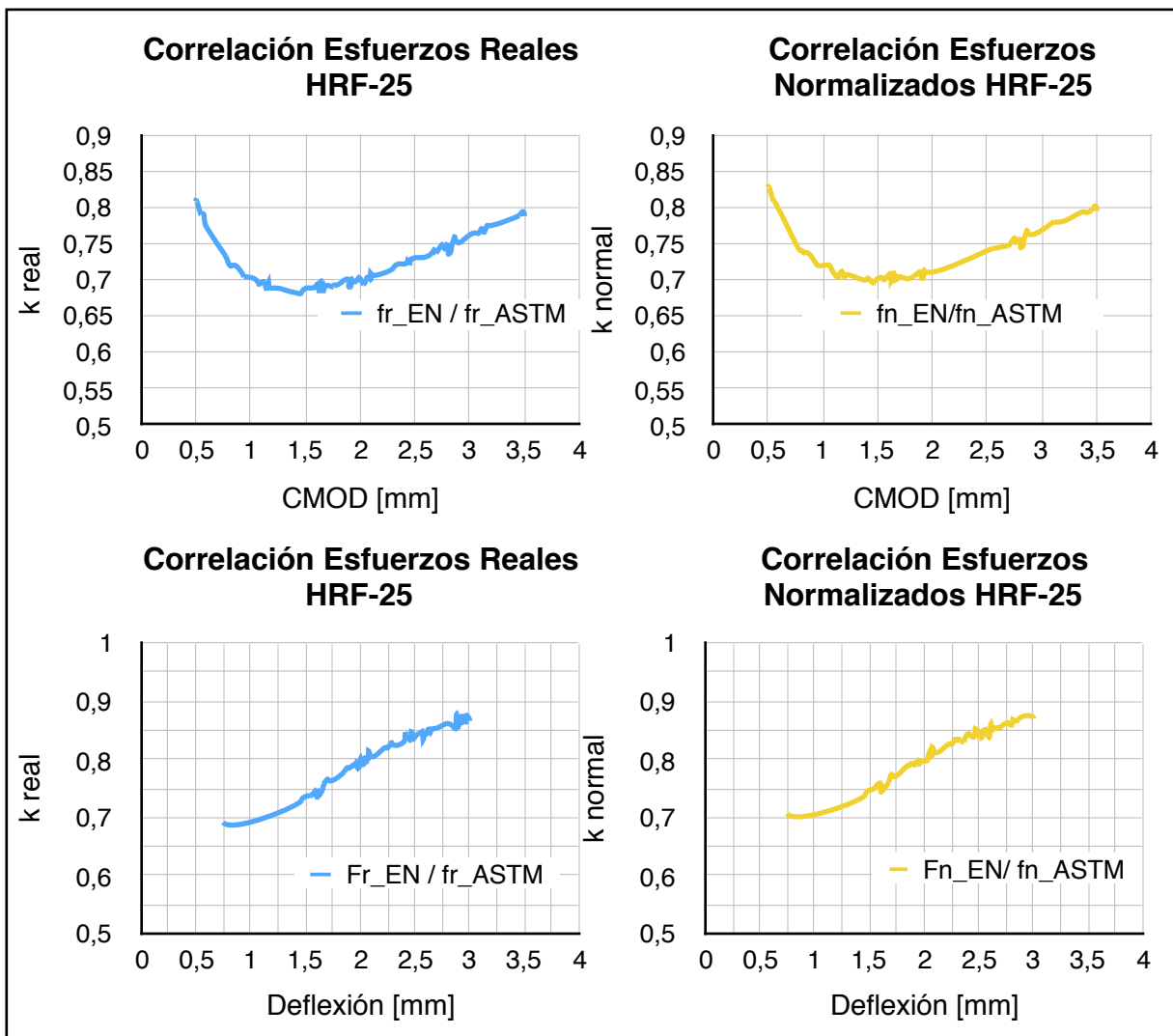


FIG.34: RELACIÓN K REAL Y K NORMAL HRF-25

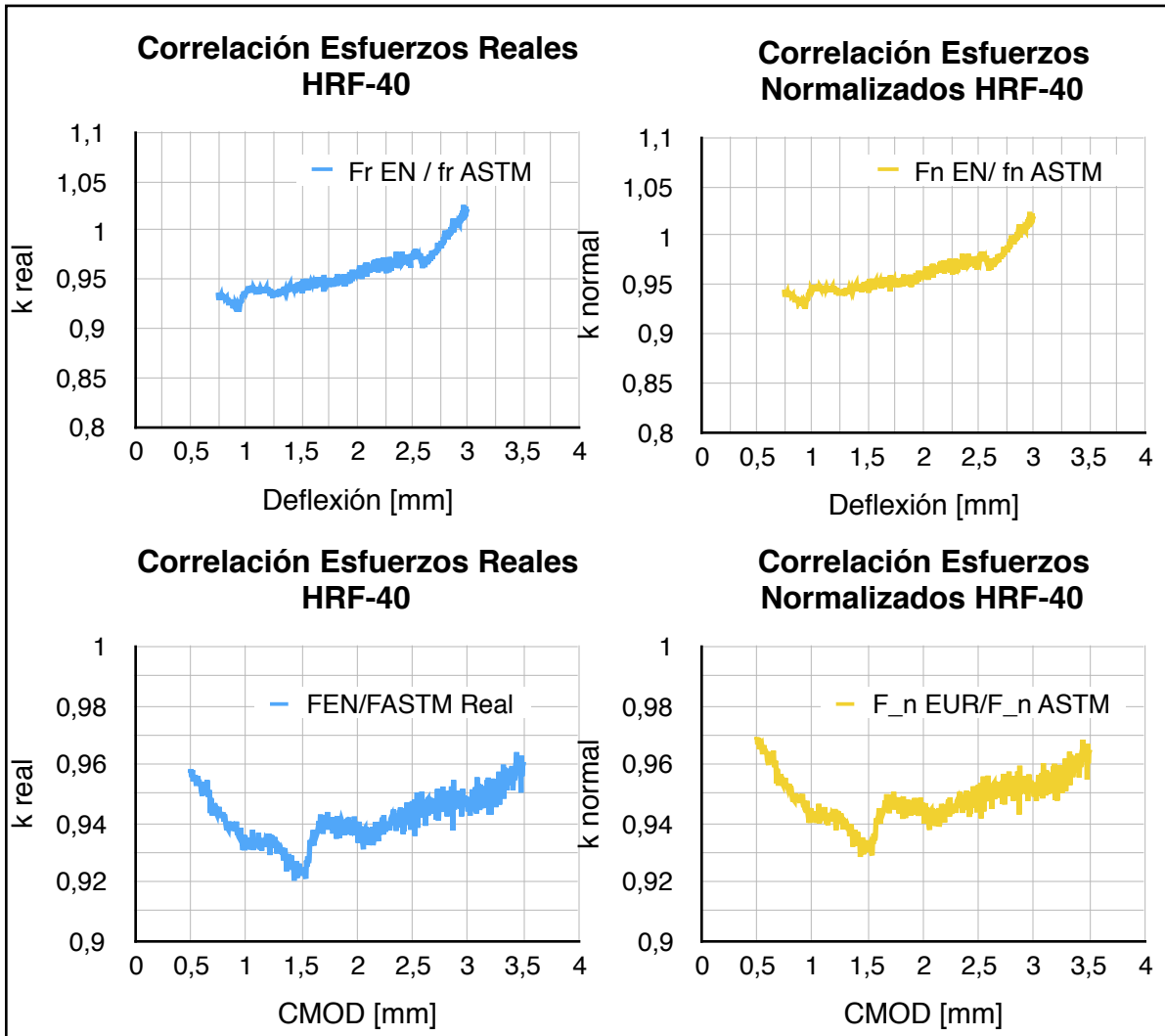


FIG.35: RELACIÓN K REAL Y K NORMAL HRF-40

Calculando el valor de $k_{real}prom$ y $k_{normal}prom$ en cada uno de los gráficos se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 8.

Correlación Esfuerzos ASTM C1609-EN 14651: Coeficientes k			
Tipo de HRF	Ensayo de Origen – >Llegada	$k_{real} Prom$	$k_{normal} Prom$
HRF-25	ASTM → EN	0,727517026	0,739760278
	EN → ASTM	0,777390626	0,785644868
HRF-40	ASTM → EN	0,94173165	0,948613599
	EN → ASTM	0,957233955	0,961689561

TABLA 8: COEFICIENTES K (HRF-25, HRF-40)

En la Ecuación N°12 y N°13; se muestra la expresión que permite relacionar los esfuerzos entre los distintos ensayos de flexión utilizando los valores de $k_{real\ prom}$ y $k_{normal\ prom}$ expuestos anteriormente.

$$f_{real\ EN} = k_{real\ prom} \cdot f_{real\ ASTM}$$

Ecuación N°12: Correlación Esfuerzos Reales ASTM-EN

$$f_{normal\ EN} = k_{normal\ prom} \cdot f_{normal\ ASTM}$$

Ecuación N°13: Correlación Esfuerzos Normalizados ASTM-EN

Esfuerzos Método EN 14651 a partir de ASTM C1609

A continuación en la Fig. 36 y Fig.37, se muestran los Esfuerzos reales y normalizados obtenidos de manera experimental, los valores calculados a través de las ecuaciones N°12 y N°13 obtenidos a partir del ensayo ASTM C1609 y la diferencia entre ambas cantidades.

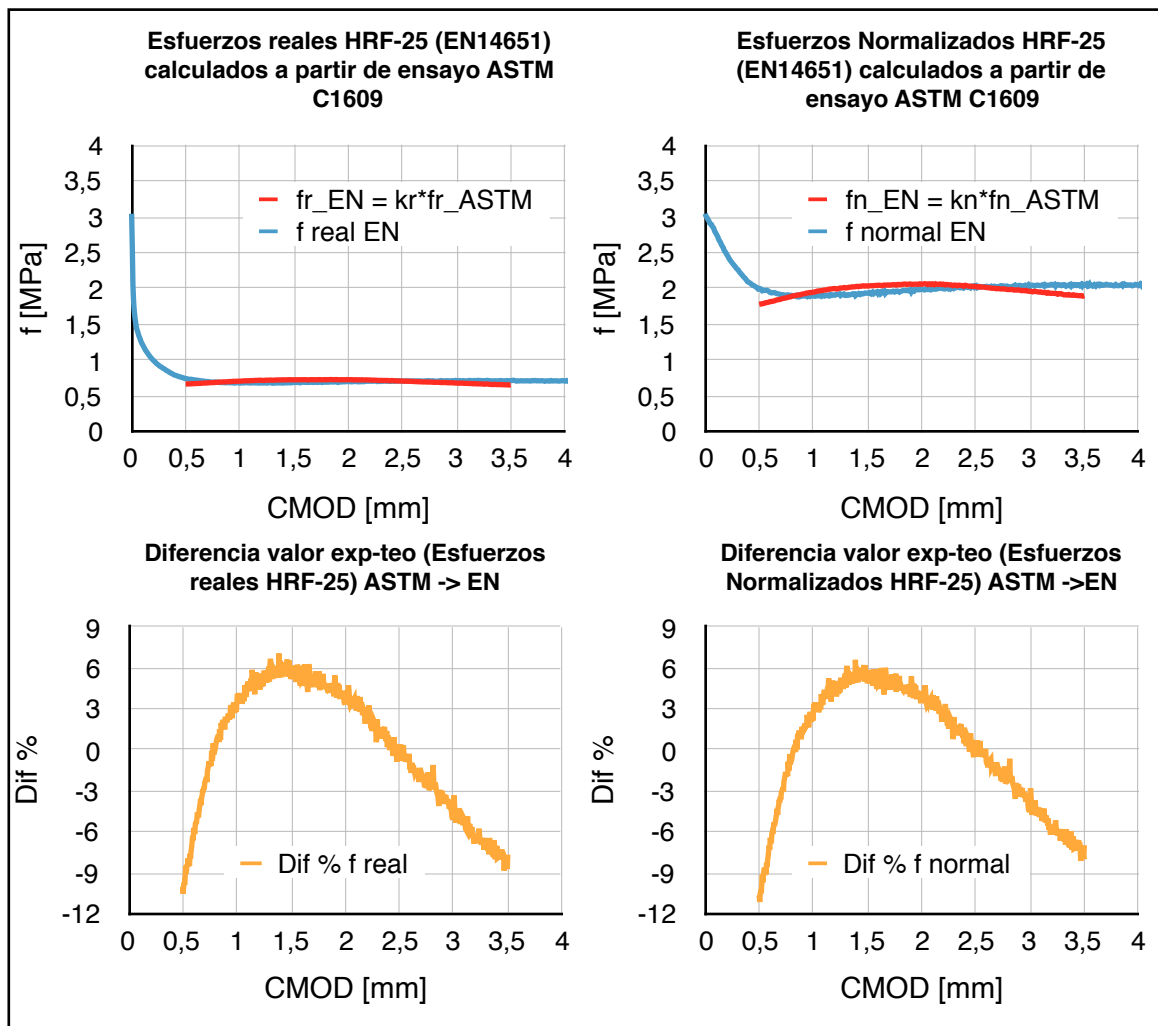


FIG.36: ESF. REALES Y NORMALIZADOS HRF-25 (EN14651 A PARTIR DE ASTM C1609)

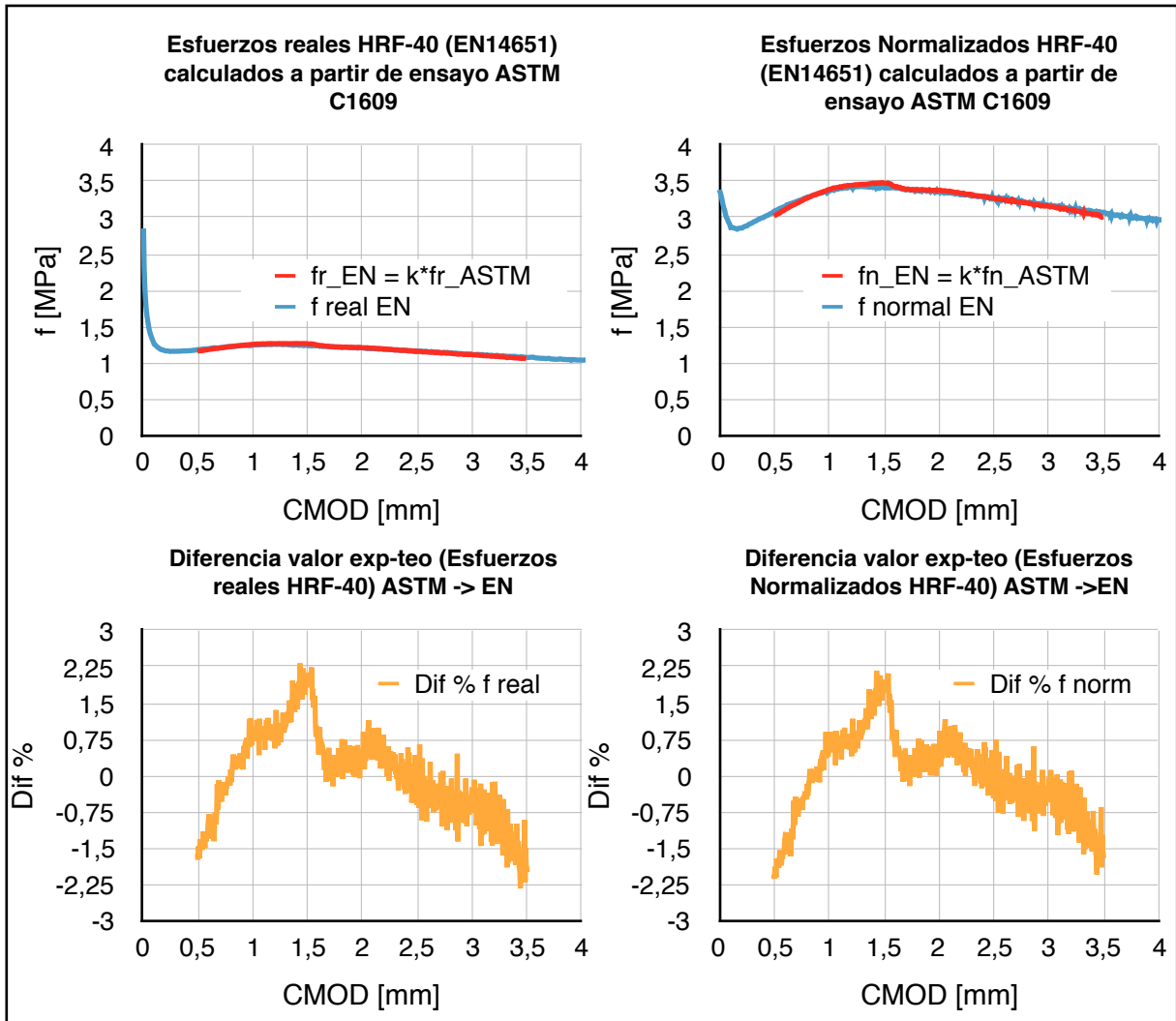


FIG.37: ESF. REALES Y NORMALIZADOS HRF-40 (EN14651 A PARTIR DE ASTM C1609)

Esfuerzos Método ASTM C1609 a partir de EN 14651

A continuación en la Fig.35 y Fig 36, se muestran, al igual que en el caso anterior, los valores de los Esfuerzos reales y normalizados obtenidos de manera experimental, los valores calculados a través de las ecuaciones N°12 y N°13, esta vez, usando los valores obtenidos mediante el método EN 14651 y la diferencia entre ambas cantidades.

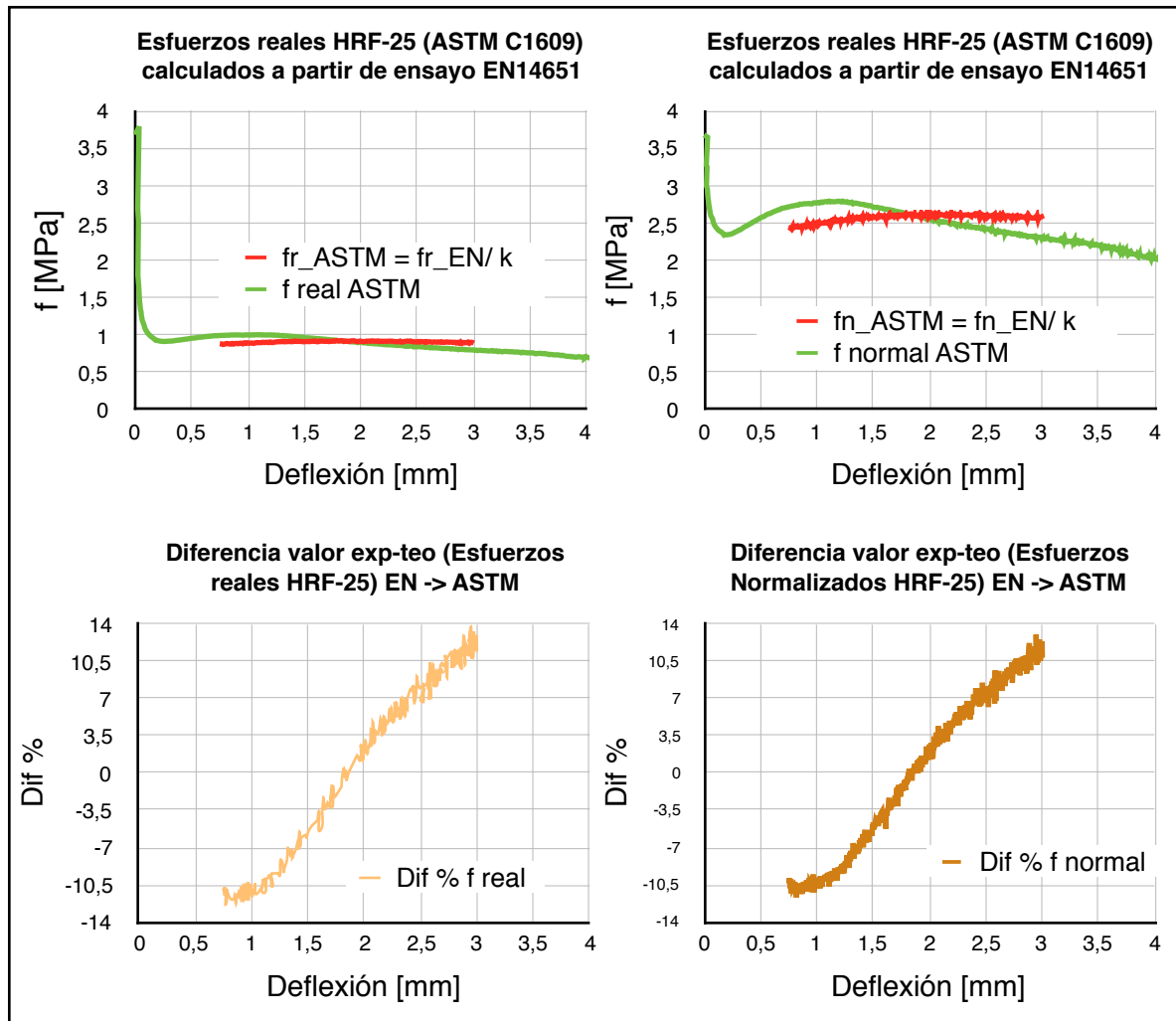


FIG.38: ESF. REALES Y NORMALIZADOS HRF-25 (ASTM C1609 A PARTIR DE EN 14651)

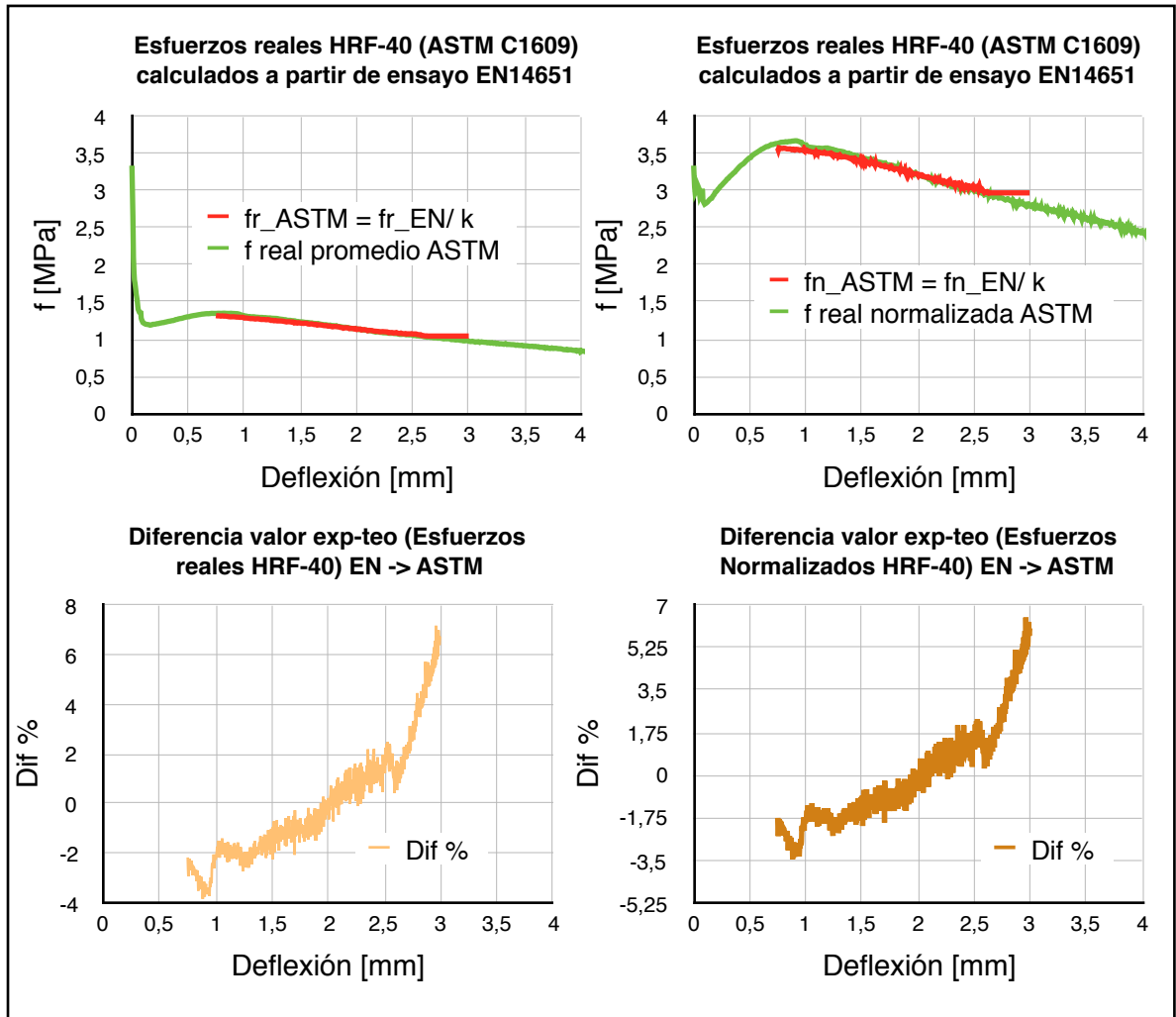


FIG.39: ESF. REALES Y NORMALIZADOS HRF-40 (ASTM C1609 A PARTIR DE EN 14651)

Efectivamente los valores calculados mediante las Ecuaciones N°12 y N°13, se aproximan de manera bastante precisa a los valores medidos de esfuerzos reales y normalizados, con diferencias porcentuales menores al 15%.

A modo de resumen, se establece a continuación la equivalencia entre las resistencias residuales para los métodos ASTM C1609 y EN 14651.

$$f_{real} EN = k \cdot f_{real} ASTM$$

$$f_{normal} EN = k \cdot f_{normal} ASTM$$

Con su respectivo valor de k , en función de la dosis de fibra en el HRF, calculados como la media de los valores de k obtenidos en cada caso.

$$k_{25} = 0,75$$

$$k_{40} = 0,95$$

A continuación en la Tabla N°9 y Tabla N°10 se muestra la equivalencia entre CMOD y Deflexión, para los valores característicos respectivos a cada ensayo

Equivalencia CMOD-Deflexión para Ensayo EN 14651 a partir de ASTM C1609			
EN 14651	w [mm]	ASTM C1609	Equivalencia $f_{CMOD_j}(EN) = k \cdot f_{d_i}(ASTM)$
CMOD [mm]		Deflexión [mm]	
0,5	0,21	0,32	$f_{CMOD=0,5} = k \cdot f_{d=0,32}$
1,5	0,63	0,9	$f_{CMOD=1,5} = k \cdot f_{d=0,90}$
2,5	1,04	1,46	$f_{CMOD=2,5} = k \cdot f_{d=1,46}$
3,5	1,46	2,0	$f_{CMOD=3,5} = k \cdot f_{d=2,00}$

TABLA 9: EQUIVALENCIA CMOD-DEFLEXIÓN (ASTM C1609 A EN 14651)

Equivalencia CMOD-Deflexión para Ensayo ASTM C1609 a partir de EN 14651			
ASTM C1609	w [mm]	EN 14651	Equivalencia $f_{d_i}(ASTM) = f_{CMOD_j}(EN) / k$
Deflexión [mm]		CMOD [mm]	
0,75	0,52	1,24	$f_{d=0,75} = f_{CMOD=1,24} / k$
3,0	2,22	5,32	$f_{d=3,00} = f_{CMOD=5,32} / k$

TABLA 10: EQUIVALENCIA DEFLEXIÓN-CMOD (EN 14651 A ASTM C1609)

Capítulo 5: Conclusiones

Al calcular los esfuerzos en ambos métodos, se observa que los esfuerzos normalizados entregan un valor considerablemente mas alto que los esfuerzos reales que soporta el HRF.

Efectivamente, el contenido de fibras tiene una repercusión, aunque leve, en el control del agrietamiento, expresado por la profundidad del eje neutro, medido por la variable x . En el HRF-40 se produce la grieta de forma mas controlada que en el HRF-25, debido a la mayor cuantía de fibras presentes en la sección agrietada, donde mayores cantidades de fibras trabajan a tracción. La variable x no depende de la resistencia del hormigón, sino, solo de la cantidad de fibras que trabajan traccionadas en la zona agrietada de la probeta.

En cuanto a la correlación de las resistencias residuales, esta efectivamente depende de la dosis de fibras presentes en el HRF. Para el HRF-25 se tiene un coeficiente promedio $k_{25} = 0,75$ y el HRF-40, un coeficiente promedio $k_{40} = 0,95$.

Al obtener los esfuerzos a partir de la correlación, la diferencia porcentual entre los esfuerzos calculados mediante esta y los esfuerzos experimentales, son menores al 12%.

Para obtener los esfuerzos ASTM C 1609 (esfuerzos asociados a $\delta = 0,75[mm]$ y $\delta = 3,0[mm]$) a partir del ensayo EN 14651, este último ensayo se debe ejecutar hasta alcanzar una apertura de fisura de al menos $CMOD = 5,32[mm]$.

Capítulo 6: Referencias

ASTM C1609/C1609M: “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)”

UNE-EN 14651: 2007: “ Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia residual a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)”

ASTM A820: “Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete”

NCh148.Of68: “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”

NCh163.Of79: “Áridos para morteros y hormigones – Requisitos Generales”

NCh170.Of85: “Hormigón - Requisitos Generales”

ASTM C1116/ C1116M: “ Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete”

Vellore S. Gopalaratman, Ravindran Gettu (1995). On the Characterization of Flexural Toughness in fiber Reinforced Concretes-

Jaume Guàrdia Tomàs, Climent Molins Borrell (2008). Caracterització del Comportament a Tracció de Formigó D'Alta Treballabilitat Reforçat amb fibres D'Acer Mitjançant L'Assaig Barcelona.