



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN  
INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL  
DEL COMPORTAMIENTO A TENSIÓN  
DEL CONCRETO REFORZADO  
CON FIBRAS

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

ING. GABRIELA IRENE ZÁRATE GARNICA

DIRECTOR DE TESINA:

DR. CARLOS MÁXIMO AIRE UNTIVEROS

MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2015



## Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de Instituto de Ingeniería de la UNAM gracias al financiamiento del Fondo de Investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Proyecto Interno 4528). Los materiales usados en este trabajo fueron donados por Cemex, Euclid y Bekaert.

Agradezco especialmente a mi tutor, Dr. Carlos Aire, por su apoyo constante, sus consejos y la confianza en mi trabajo. Por la dedicación e interés que siempre me ha brindado. Sus conocimientos, orientación, manera de trabajar, persistencia y motivación han sido fundamentales en mi formación académica y profesional durante los últimos 2 años.

También quiero agradecer el apoyo y la contribución en el desarrollo del proyecto y la realización de los ensayos a quienes trabajan en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en especial a Concepción García Ocaña.

Gracias a mis padres, Irene y Julio, por apoyarme, brindarme su amor, cariño, confianza y comprensión en todo momento. También a mi abuela Esperanza, que aunque ya no está presente físicamente, siempre la llevo en mi corazón.

## Índice

<b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
Antecedentes .....	4
Objetivos .....	5
Hipótesis.....	5
Metodología .....	5
<b>Capítulo 1. Estado del conocimiento</b> .....	<b>7</b>
1.1 Introducción.....	7
1.2 Concreto reforzado con fibras .....	7
1.3 Evaluación del comportamiento del concreto reforzado con fibras.....	8
1.3.1 Ensayo de flexión en vigas .....	12
1.3.2 Ensayo de paneles.....	13
1.3.3 Ensayo Barcelona .....	15
<b>Capítulo 2. Caracterización multidireccional de doble punzonamiento</b> .....	<b>18</b>
2.1 Introducción .....	18
2.2 Descripción .....	18
2.3 Aplicación del método.....	20
2.3.1 Materiales .....	21
2.3.2 Fabricación.....	22
<b>Capítulo 3. Resultados</b> .....	<b>26</b>
3.1 Peso unitario, revenimiento y contenido de aire .....	26
3.2 Ensayo de resistencia a compresión.....	26
3.3 Ensayo Multidireccional de Doble Punzonamiento (MDPT) .....	27
3.3.1 Generalidades .....	27
3.3.2 Modo de falla .....	28
3.3.3 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón.....	29
3.3.4 Análisis de resultados.....	34
<b>3.3.4.1 Carga máxima</b> .....	34
<b>3.3.4.2 Carga residual</b> .....	36
<b>3.3.4.3 Tenacidad</b> .....	39
<b>3.3.4.4 Abertura de fisura</b> .....	42
<b>Capítulo 4. Conclusiones</b> .....	<b>45</b>
4.1 Resumen de resultados .....	45
4.2 Conclusiones generales .....	46
<b>Referencias</b> .....	<b>48</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>51</b>
<b>A-1</b> .....	<b>51</b>
<b>A-2</b> .....	<b>52</b>
<b>A-3</b> .....	<b>53</b>

## Introducción

### Antecedentes

El concreto, desde su aparición, ha sido fundamental para el desarrollo de la humanidad. Es el material más utilizado en la construcción, una de sus grandes ventajas es su versatilidad que le permite moldearse en prácticamente cualquier forma y geometría.

El concreto es un material con un comportamiento variable, tiene alta resistencia a la compresión pero es débil en tensión. Esto ha llevado a la necesidad de reforzar las partes que trabajan a tensión de las estructuras de concreto. Tradicionalmente, esto se hace con barras de acero. Sin embargo, la necesidad de construir y diseñar estructuras con geometrías más complejas ha llevado al desarrollo de materiales de refuerzo, relativamente nuevos como lo son las fibras de acero o de materiales sintéticos.

La incorporación de fibras en proporciones adecuadas permite mejorar las características del concreto. En general, el concreto reforzado con fibras (CRF) presenta un mejor comportamiento a flexión, mayor resistencia a tensión y un aumento de la durabilidad.

En los últimos años, el CRF ha sido indispensable para la construcción, se ha utilizado en el revestimiento de túneles, construcción de pisos industriales, pavimentos, concreto lanzado para la estabilidad de taludes, cubiertas para puentes, entre otros. Los avances en el estudio del CRF han permitido la eliminación del refuerzo por cambios volumétricos y la disminución total del armado.

Durante décadas se ha estudiado al CRF, recientemente se ha avanzado en su caracterización mecánica en términos de resistencias residuales y energía de absorción. Además, se han desarrollado especificaciones y métodos de prueba específicas para CRF (Blanco et al., 2010), que han favorecido a la confianza en su uso como una solución estructural (Serna et al., 2009). Sin embargo, hay interés en estudiar algunas áreas que requieren atención. Una de especial importancia es la orientación de las fibras en el concreto y su posterior comportamiento.

En el CRF la orientación y distribución del refuerzo constituyen factores determinantes para la respuesta mecánica. La incorporación de fibra mejora la isotropía del concreto, sin embargo, no proporciona un refuerzo uniforme. La orientación preferente de la fibra en la matriz de concreto es resultado de diversos aspectos como el mezclado, compactación, colocación y efectos de borde de los moldes. En el CRF el vibrado favorece la orientación de las fibras en planos horizontales (Gettu et al., 2005). En el CRF autocompactable las fibras se pueden orientar en la dirección del flujo (Stahli et al., 2008; Vandewalle et al., 2008 y Yardimci et al., 2008), alineándose a lo largo de las paredes de los moldes, por lo que el modo de colocación del concreto puede tener gran incidencia (Torrijos et al., 2010). Algunos autores indican que el efecto de la longitud de las fibras en su alineación es despreciable (Vandewalle et al., 2008), otros coinciden en que a mayor longitud de las fibras aumenta su orientación (Yardimci et al., 2008). Para un determinado tipo y contenido de fibras las propiedades mecánicas, en especial la capacidad post-pico, se relacionan con la densidad de las fibras (Tobes et al., 2008). Todos

estos factores influyen en la orientación preferencial de las fibras y como resultado en el comportamiento estructural de un elemento de CRF.

La configuración de los principales métodos de prueba y control para caracterizar el CRF, que se usan en la actualidad permiten únicamente la caracterización unidireccional del material, lo cual limita la obtención de información bajo condiciones diferentes. Dada la importancia de conocer la respuesta mecánica del comportamiento del CRF en las tres direcciones, existe la necesidad de desarrollar nuevas metodologías que permitan evaluar el desempeño multidireccional de las fibras y del CRF.

## **Objetivos**

El principal objetivo de esta tesina es el de obtener información de la contribución estructural de las fibras en función de su orientación en la matriz de concreto en la etapa de comportamiento post-fisuración, para lo cual se utilizará el método de ensayo multidireccional de doble punzonamiento que permite cuantificar la contribución estructural de las fibras en cada una de las direcciones de los tres ejes cartesianos.

Se evaluará la influencia de la dirección de carga (Ejes X, Y y Z), la cuantía y el tipo de fibra en los resultados del ensayo multidireccional de doble punzonamiento aplicado a probetas cúbicas moldeadas de 150 x 150 x 150 mm. Se emplearán dos tipos de fibras, de acero y sintéticas.

## **Hipótesis**

Se pretende implementar la metodología del ensayo multidireccional de doble punzonamiento para obtener información de la importancia de la orientación de las fibras en la matriz del concreto.

Se espera que los resultados se vean influenciados por la dirección de la carga, arrojando mayores valores cuando se ensaye en la dirección del colado y que para el caso de carga residual y tenacidad, que éstas aumenten a medida que se incrementa la cantidad de fibra y que los valores más altos se den en el caso de las probetas con fibras de acero.

## **Metodología**

El procedimiento que se siguió para desarrollar el tema queda descrito en la estructura de la presente tesina. En primer lugar se realiza una recopilación de información acerca de los principales métodos para caracterizar el comportamiento a tensión del concreto reforzado con fibras. Se destaca el método de prueba ensayo multidireccional de doble punzonamiento.

Se implementó el ensayo multidireccional de doble punzonamiento para evaluar la influencia de la orientación de las fibras en la matriz de concreto. Los estudios se realizaron empleando 40, 60 y 80 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero y 2, 5, 7 y 9 kg/m<sup>3</sup> de fibra

sintética (0.2, 0.5, 0.7 y 0.9%) en probetas cúbicas moldeadas de 150 mm por lado, ensayándolas en los tres ejes principales.

Posteriormente, se hizo un extenso análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones.

## **Capítulo 1. Estado del conocimiento**

### **1.1 Introducción**

El concreto reforzado con fibras ha experimentado una evolución desde su aparición. Se ha utilizado en varias aplicaciones con baja responsabilidad estructural y actualmente su empleo se ha incrementado debido a los beneficios que aportan las fibras. En cuanto a ventajas estructurales, mejoran la resistencia a tensión incrementando la ductilidad y la tenacidad, ayudan al control de fisuras, resistencia al impacto, fuego, a la flexión y a corte, entre otras.

Actualmente, existen varias normas que evalúan el comportamiento del concreto reforzado con fibras. Tradicionalmente, se ensayan vigas cargadas al centro o a los tercios y paneles de sección cuadrada o circular, en donde se determinan las cargas y resistencias residuales así como la absorción de energía. Recientemente se introdujo como una alternativa el ensayo Barcelona de doble punzonamiento que permite evaluar la tenacidad y la resistencia residual.

El objetivo de este capítulo es el de describir al concreto reforzado con fibras analizando su composición, propiedades y comportamiento mecánico. Además se describe de manera resumida algunos de los ensayos que existen para evaluar su comportamiento.

### **1.2 Concreto reforzado con fibras**

El ACI 116R-00 (Cement and Concrete Terminology) define al concreto reforzado con fibras (CRF) como un material compuesto que consiste esencialmente de cemento hidráulico, agua, agregados fino y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas orientadas aleatoriamente.

La norma ASTM C 1116 (Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete) define a las fibras como: "Filamentos finos y elongados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de concreto fresco". Así mismo, el ACI 544 (Fiber-Reinforced Concrete) considera como fibras para el concreto los filamentos discontinuos de acero, las fibras sintéticas, las de vidrio y las naturales.

Dependiendo de su origen, las fibras pueden ser naturales o artificiales, tienen como objetivo reforzar la masa del cemento incrementando la resistencia a la tensión, disminuyendo la fisuración y aumentando la tenacidad. Además de que la adición de fibras disminuye los efectos de la contracción por fraguado y aumenta la resistencia al impacto y a la fatiga.

Las fibras más utilizadas son las de acero, aunque también las hay sintéticas como lo son las de acrílico, aramida, nylon poliéster, polietileno y de polipropileno. La elección del tipo de fibras y la dosificación a utilizar depende del tipo de aplicación que se va a realizar. Las fibras de acero se utilizan para mejorar la resistencia a tensión, flexión, fatiga y la

capacidad de absorción de energía. Mientras que las microfibras de polipropileno buscan un control de fisuración y se utilizan en concretos resistentes a choques o impactos. Por otro lado, las macrofibras sintéticas pueden ser utilizadas para funciones estructurales. Si bien las fibras plásticas no resultan tan eficientes como las fibras de acero, en algunas aplicaciones los efectos de la utilización de las macrofibras pueden ser comparables a las fibras de acero según las cuantías incorporadas en cada caso.

Las fibras pueden presentar una función estructural, si su contribución permite reducir el refuerzo convencional considerándolo en la comprobación de Estados Últimos o Estados Límites de Servicio. En caso contrario, su carácter no estructural implica que únicamente pueden considerarse para la mejora de la resistencia al fuego, abrasión, el control de fisuración, etc.

### **1.3 Evaluación del comportamiento del concreto reforzado con fibras**

El aspecto más importante del comportamiento mecánico del CRF es su resistencia a tensión, la cual está relacionado con los mecanismos de falla por adherencia y de interfaz friccional que se desarrollan entre la matriz y las fibras.

Al ser un sistema compuesto de diversos materiales, el comportamiento del CRF, depende de las propiedades de sus componentes y de la interacción física, química y mecánica que existe entre ellos. Para un comportamiento óptimo, las fibras deberán estar distribuidas de manera homogénea en la matriz.

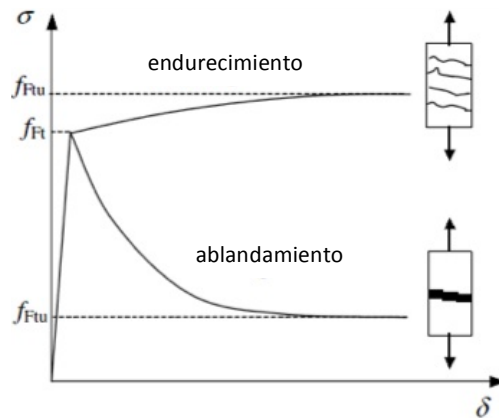
El principal propósito de usar fibras en el concreto es el de capitalizar la fuerza, unión y rigidez de la matriz. El uso de fibras en matrices frágiles o débiles a la tensión incrementa su ductilidad, ya que el esfuerzo último de la matriz es menor que el de las fibras, por lo tanto, la matriz falla antes que la capacidad última de las fibras se alcance. Las fibras cosen la fisura y contribuyen a la disipación de la energía.

Cuando el CRF es sometido a una carga, se produce una respuesta lineal hasta alcanzar la carga máxima. Tras ello, el CRF tiene la capacidad de seguir resistiendo cargas debido a la ductilidad que le aportan las fibras. Esto conlleva a un aporte de resistencia que depende del tipo, geometría, cuantía, orientación y el comportamiento pull-out de las fibras. Por lo tanto, la principal importancia de la contribución de las fibras se da en el incremento de la fuerza residual.

Se ha demostrado que en menores cantidades las fibras tienen un efecto insignificante tanto para la resistencia a compresión como para la de tensión. Sin embargo, contribuyen de manera importante a la tenacidad y al comportamiento post-fisuración del concreto.

El comportamiento del concreto reforzado con fibras varía dependiendo de su composición y puede experimentar ablandamiento o endurecimiento, ver figura 1.1. El endurecimiento permite la formación de múltiples fisuras antes de la falla mientras que en el hay una reducción de la resistencia después de presentarse la primera fisura que no permite la formación de más fisuras.





**Figura 1.1 Comportamiento post-fisuración a tensión del CRF**

La fuerza residual en la etapa post-fisuración del CRF es significativa y no puede ser ignorada. Por ello, durante los últimos años, distintos comités en especial los europeos han planteado modelos constitutivos para describir el comportamiento del CRF. En la tabla 1.1 se presentan los modelos constitutivos propuestos por las normativas europeas (Norma alemana: DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, RILEM, Norma italiana: CNRT-DT 204, FIB Model Code y la norma española: EHE) que han sido agrupados según su diagrama (lineal, bilineal y trilineal), indicando los parámetros que definen los modelos y se representa esquemáticamente el ensayo requerido para obtener dichos valores.

La German Concrete Society, publicó en el año 2001 la normativa (DBV, 2001) en la que propone la utilización de un modelo trilineal para Estados Límite de Servicio (ELS) con la posibilidad de utilizar un diagrama bilineal e incluso lineal para Estados Límite Últimos (ELU). Los diagramas se obtienen de un ensayo a flexión en vigas en cuatro puntos (“4-point bending test”).

La diferencia principal entre la RILEM y la DBV radica en que la norma francesa utiliza el ensayo a flexión en 3 puntos (“3-point bending test”) además de que utiliza las resistencias residuales.

La norma italiana propone el modelo elástico-lineal y el modelo rígido-plástico. Los modelos emplean el concepto de resistencias a flexión equivalentes y se definen por medio de ensayos a flexión en 4 puntos. El modelo propuesto en el FIB Model Code es el mismo presentado en la norma italiana.

La norma española EHE presenta dos diagramas tensión-deformación: un diagrama lineal y uno multilineal, cuya aplicación depende de la situación a tratar. Los parámetros se definen a partir de las resistencias a flexión residuales obtenidas a partir del ensayo a flexión EN 14651.

El aumento de aplicaciones que se le han dado al CRF ha hecho que se produzca una evolución en los métodos de ensayo y que el comportamiento mecánico del CRF se describa con el uso de parámetros poco acostumbrados como el de la tenacidad (absorción de energía) o resistencia residual además de la resistencia a tensión.

Por lo general, el comportamiento a tensión se caracteriza mediante la respuesta de abertura de fisura, la cual varía dependiendo del tipo y cantidad de fibra. También se puede caracterizar utilizando el parámetro de absorción de energía, que se obtiene de la integración del área bajo la curva carga vs desplazamiento. Cuanto mayor sea la capacidad del concreto para soportar una carga en estado de fisuración, mayor será la absorción de energía de la probeta.

Tabla 1.1 Modelos constitutivos para el CRF (Blanco *et al.*, 2013)

Diagrama	Parámetro	Ensayo	
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf} \leq f_{eq,ctd,I}$ ( $\alpha_{sys}$ : coeficiente por efecto tamaño; $\alpha_c^f$ : coeficiente de comportamiento diferido) $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\%$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Fu} = f_{eq2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening} ; 10\% \text{ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctR,d} = 0.33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ flexión} ; 10\% \text{ tracción}]$	EN 14651 	EHE
	$\sigma_1 = f_{Fu} = f_{R3}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening} ; 10\% \text{ hardening}]$	EN 14651 	MC
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf}$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf} \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\%$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Fis} = 0.45 f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Fu} = k[f_{Fis} - (w_u/w_{i2})(f_{Fis} - 0.5 f_{eq2} + 0.2 f_{eq1})]$ $k = [0.7 \text{ tracción, 1 otros casos}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening} ; 10\% \text{ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctd} = \alpha_c^f \cdot f_{ctk,II} / \gamma_{cf}$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf}$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{cf} \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ ; $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\%$ ; $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10\%$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = 0.7 f_{ctm,II} (1.6-d)$ ; $\sigma_2 = 0.45 \cdot \kappa_k \cdot f_{R,1}$ ; $\sigma_3 = 0.37 \cdot \kappa_k \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ ; $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\%$ ; $\epsilon_3 = \epsilon_u = 25\%$	RILEM TEST 	RILEM
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0.6 f_{ct,II,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0.45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1(0.5 f_{R,3,d} - 0.2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0.1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,D}$ $\epsilon_3 = 2.5 / l_{cs}$ ( $l_{cs}$ : longitud característica) $\epsilon_u = [20\% \text{ flexión} ; 10\% \text{ tracción pura}]$	EN 14651 	EHE
	$f_{ctm} = 0.30 (f_{ck})^{2/3}$ $f_{Fis} = 0.45 f_{R1}$ $f_{Fu} = k[f_{Fis} - (w_u / CMOD_3)(f_{Fis} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{R1})]$ $\epsilon_{SLU} = CMOD_1 / l_{cs}$ $\epsilon_{SLU} = w_u / l_{cs} = \min(\epsilon_{Fis}, 2.5 / l_{cs} = 2.5 / y)$ $\epsilon_{Fu} = [20\% \text{ softening} ; 10\% \text{ hardening}]$	EN 14651 	MC

### 1.3.1 Ensayo de flexión en vigas

Los ensayos de flexión en vigas son los más usados para caracterizar al concreto reforzado con fibras. Se realizan sobre vigas en las que la carga se aplica al centro o a los tercios del claro. Las vigas son de sección transversal cuadrada con un claro mínimo tres veces la dimensión del peralte. Para controlar la respuesta post-pico en la flexión, se puede realizar en vigas con ranura.

Existen tres procedimientos estandarizados de ensayo de vigas, la norma belga NBN B 15-238, la europea EFNARC 1996 y la americana ASTM C1609, en los que la carga se aplica a los tercios del claro. En la figura 1.2 se presenta un esquema del dispositivo usado para desarrollar este tipo de ensayo y la instrumentación. Durante este ensayo se registra la carga y el desplazamiento en el centro de la viga.

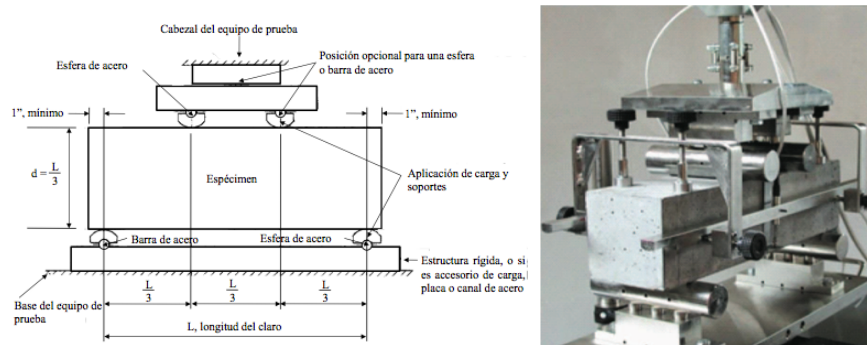


Figura 1.2 Ensayo de flexión con carga a los tercios (ASTM C1609)

Con este ensayo se grafica una curva carga vs flecha con la cual se obtienen los parámetros de resistencia a la primera fisura, resistencia residual y tenacidad. La tenacidad se determina como el área bajo la curva carga vs flecha. La figura 1.3 muestra un esquema del comportamiento. Los resultados de este ensayo se pueden usar para comparar el comportamiento de mezclas de CRF o en investigación. También son útiles para el control de calidad, verificar el cumplimiento de especificaciones u obtener resistencias a flexión de miembros de CRF.

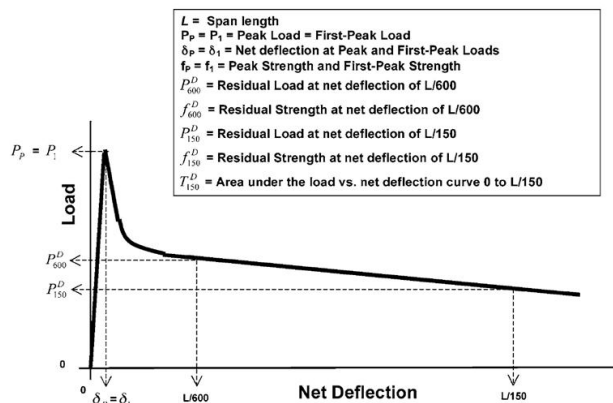


Figura 1.3 Curva típica carga vs flecha para determinar los parámetros del ensayo de flexión con carga a los tercios (ASTM C1609)

El ensayo de flexión en tres puntos definido por la recomendación de la RILEM TC 162 – TDF, actualmente la norma europea EN 14651, emplea vigas simplemente apoyadas, con una ranura en el extremo inferior que se someten a una carga central. La carga varía en el tiempo en función de la abertura de fisura.

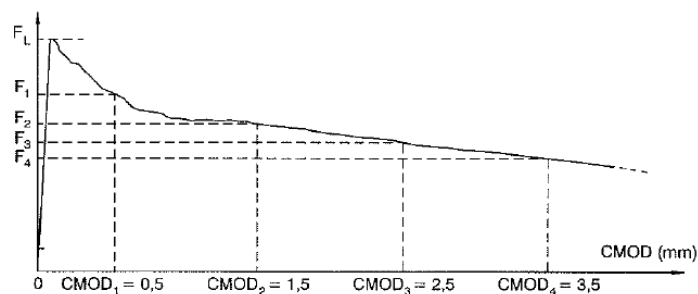
El ensayo se puede realizar en vigas de 100 x 100 x 400 mm o 150 x 150 x 600 mm con una ranura central de 12.5 mm de profundidad y 5 mm de espesor. La norma EN 14651 señala que la viga debe tener un ancho y profundidad nominal de 150 mm y una longitud entre 550 y 700 mm.

El ensayo se realiza con control de abertura de fisura, CMOD (Crack Mouth Opening Displacement), para lo cual se utilizan ~~dos LVDTs~~ y un extensómetro como se muestra en la figura 1.4. La carga y la abertura se registran durante todo el ensayo, con lo cual se puede obtener una curva típica carga vs CMOD como la que se muestra en la figura 1.5. Con este ensayo se puede determinar la resistencia residual a los valores de CMOD especificados en la EN 14651.



**Figura 1.4 Instrumentación de ensayo de flexión en tres puntos (EN 14651)**

Este ensayo es simple y debido al control de CMOD se asegura una propagación estable de la fisura. Además que con la curva carga vs CMOD o carga vs deflexión se pueden calcular relaciones tensión vs deformación o tensión vs ancho de fisura.



**Figura 1.5 Curva típica carga vs CMOD (EN 14651)**

### **1.3.2 Ensayo de paneles**

Los ensayos de flexión en vigas presentan resultados con dispersiones relativamente altas (20-25%). Como alternativa se introdujo el ensayo de paneles, que pueden ser de sección cuadrada o circular.

El ensayo de panel cuadrado EFNARC (EFNARC, 1996) consiste en aplicar una carga puntual al centro de un panel de 100 x 600 x 600 mm simplemente apoyado sobre cuatro líneas externas situadas en una base plana cuadrada de 500 x 500 mm. En la figura 1.6 se muestran la configuración de este ensayo.



**Figura 1.6 Configuración del panel cuadrado (EFNARC, 1996)**

El comportamiento del panel se evalúa con la medida de la carga máxima y la energía absorbida para una flecha central de 25 mm. La energía absorbida se calcula integrando el área bajo la curva carga vs desplazamiento. Como ya se ha mencionado, mientras mayor sea este valor, mayor será la capacidad para soportar carga en estado de fisuración.

Una de las ventajas del ensayo EFNARC del panel es que la superficie de rotura es mayor, por lo que los resultados se asemejan más a la realidad. Las estructuras reales se caracterizan por tener un alto grado de hiperestaticidad, en donde la redistribución de los esfuerzos genera áreas de fractura mayores. Al ser especímenes con mayores áreas se obtiene resultados con menor dispersión. Sin embargo, este ensayo tiene una serie de inconvenientes, el más importante es la dificultad que implica fabricar un panel con la base plana. Cuando la base no es plana, se deforma de manera impredecible, presentando múltiples picos en la capacidad de carga. Esto hace que el ensayo no sea tan atractivo para el control de calidad.

Una alternativa al ensayo de panel EFNARC es el Round Determinate Panel (RDP) (ASTM C1550, 2002), desarrollado por Bernard y Pircher (Bernard, 1999; Bernard y Pircher, 2001), propuesto para evaluar el comportamiento post-pico del CRF. Este ensayo pretende eliminar los defectos que se tienen en el ensayo de panel EFNARC.

Este ensayo consiste en aplicar una carga puntual central en un panel circular, que mide 75 x  $\phi$  800 mm, apoyada en tres puntos situados simétricamente en una circunferencia de diámetro de 750 mm, como se puede observar en la figura 1.7.



**Figura 1.7 Ensayo de panel circular (ASTM C1550)**

Al usar tres puntos de apoyo, se asegura que el apoyo sea uniforme y que los planos de fisuración se encuentren bien definidos por lo que se puede predecir de manera más real la distribución de la carga.

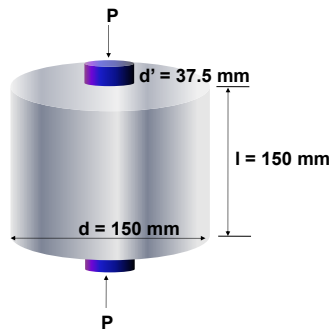
Para evaluar el comportamiento del CRF se mide la capacidad de carga a la primera fisura y la capacidad de absorber energía para valores característicos del desplazamiento del punto medio del panel. Estos valores van desde los 5 mm hasta los 40 mm.

Por lo general, bajo la carga central puntual, el panel falla formando tres fisuras radiales que empiezan en el centro del panel y cortan cada uno de las secciones no apoyadas del panel.

El ensayo de panel de sección circular es una alternativa importante sobre las vigas y el panel de sección cuadrada EFNARC, los resultados presentan un coeficiente de variación en los parámetros de comportamiento de post-fisuración del 6 al 13% además de que tiene la ventaja de la simplicidad en la fabricación y en la configuración del ensayo. Sin embargo, una de las desventajas es que es un ensayo de difícil aplicación sistemática debido al tamaño y peso del panel, que es de aproximadamente 90 kg.

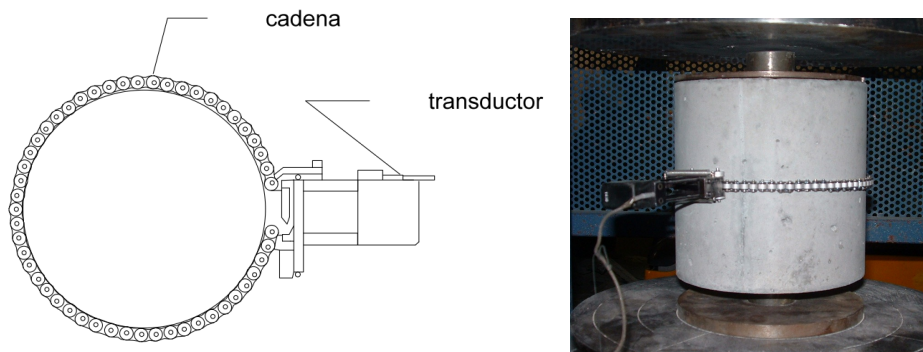
### **1.3.3 Ensayo Barcelona**

El ensayo Barcelona fue desarrollado por Aguado *et al.* (2005) con el objetivo de contar con un ensayo adecuado para el control sistemático del CRF. Éste es un ensayo de tensión indirecta basado en el *Double-Punching Test* (DPT) o ensayo de doble punzonamiento propuesto por Chen en 1970. Consiste en someter a compresión axial a un cilindro, de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura (Figura 1.8), mediante dos punzones de acero de un diámetro cuatro veces menor, dispuestos concéntricamente por encima y por debajo del cilindro. La carga aplicada produce un incremento de la tensión sobre los planos que contienen el eje del cilindro y la probeta se fractura a lo largo de estos planos. Por lo general, aparecen 3 fisuras radiales en la probeta ensayada, sin embargo, también se pueden formar de 2 a 4 fisuras.



**Figura 1.8 Ensayo Barcelona de doble punzonamiento**

Es un método de prueba aprobado para caracterizar al CRF y su metodología se describe en la norma española UNE-83515 (2010). De acuerdo con la norma, se debe utilizar un transductor electrónico calibrado con un rango mínimo de 10 mm que abrace circunferencialmente a la probeta como se muestra en la figura 1.9. La cadena circunferencial con transductor o extensómetro debe colocarse a la mitad de la altura de la probeta. Su función es la de medir el desplazamiento circunferencial total y registrar la abertura de fisura durante todo el ensayo para obtener la curva carga vs abertura circunferencial de la cual se extraen los valores de resistencia residual y tenacidad que especifica la norma.



**Figura 1.9 Cadena circunferencial y transductor**

El ensayo Barcelona se utiliza para obtener varias características y parámetros útiles para caracterizar el comportamiento del CRF. El registro continuo de la carga y la abertura circunferencial durante el ensayo, permite obtener la curva carga vs desplazamiento circunferencial que describe el comportamiento a tensión indirecta del material, útil para determinar la resistencia a la fisuración, resistencia residual y la tenacidad. En la figura 1.10 se muestra un diagrama típico de carga y energía vs desplazamiento circunferencial. La UNE 83515 especifica que la resistencia residual a tensión del concreto y la energía (tenacidad) se deben determinar para los valores de desplazamiento circunferencial total de 2, 2.5, 4 y 6 mm.



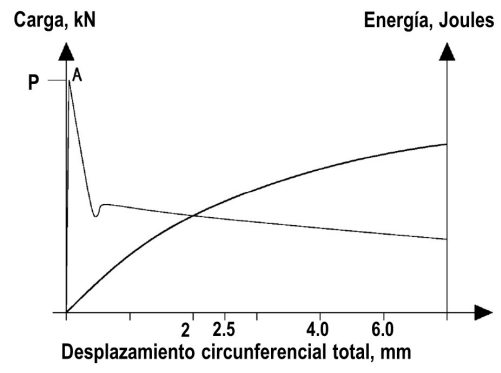


Figura 1.10 Curva de carga y energía vs desplazamiento circunferencial (UNE 83515)

## Capítulo 2. Caracterización multidireccional de doble punzonamiento

### 2.1 Introducción

El CRF es un material anisótropo, es decir, las fibras no proporcionan un refuerzo uniforme con igual rendimiento en las tres direcciones. En la mayoría de los casos, las fibras se orientan en la matriz del concreto dependiendo de diversos aspectos como el colado, la compactación, el efecto pared de los moldes, el método de fabricación, entre otros. Todos estos factores influyen en la orientación final de las fibras en el concreto y en consecuencia afecta su eficiencia y comportamiento estructural. Por este motivo la orientación debería tenerse en cuenta en el diseño de elementos de CRF.

La identificación de un procedimiento preciso y adecuado para diseñar elementos de concreto reforzado con fibras es fundamental para extender su aplicación. Este procedimiento debe incluir métodos de ensayo para caracterizar el comportamiento del material de una forma representativa de la realidad incluyendo los parámetros que influyen en la respuesta estructural del material como la orientación de las fibras.

Recientemente, el ensayo de caracterización multidireccional aplicado a probetas cúbicas fue propuesto como una alternativa al ya mencionado ensayo Barcelona. Este nuevo ensayo permite evaluar la contribución de las fibras dependiendo de su orientación en el concreto, además de que presenta la ventaja de no requerir una cadena extensométrica para medir la abertura de fisura. El modelo analítico desarrollado por Pujadas (2013) permite la conversión del desplazamiento circunferencial en desplazamiento del pistón del equipo de ensayo. A diferencia del ensayo Barcelona, y debido a las características geométricas de la probeta cúbica, el control del ensayo multidireccional se realiza por control del desplazamiento del pistón en lugar del control de desplazamiento circunferencial.

En este capítulo se describirá al ensayo incluyendo sus características y el procedimiento. Además se expondrá la aplicación del método describiendo los materiales y sus dosificaciones así como el proceso de fabricación de los elementos ensayados.

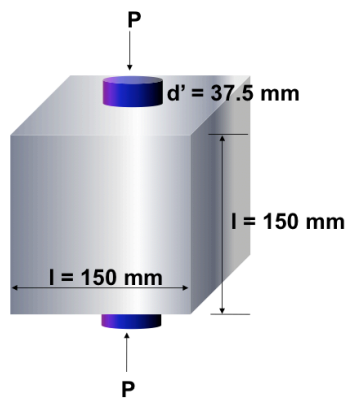
Con el ensayo multidireccional de doble punzonamiento (MDPT), el material puede ser caracterizado según tres direcciones, correspondientes a los tres ejes principales. Se obtendrá una gráfica carga vs desplazamiento del pistón con la cual se podrá comparar cual es la contribución de las fibras dependiendo de su orientación en el concreto. Para finalmente presentar los resultados.

### 2.2 Descripción

El ensayo multidireccional es un nuevo método propuesto por Pujadas *et al.* (2011) con el objetivo de evaluar la contribución estructural de las fibras en el comportamiento post-fisuración dependiendo de la orientación. Está basado en el ensayo Barcelona (Molins *et al.* 2006; Molins *et al.* 2009) y evalúa la carga máxima, carga residual y tenacidad del CRF teniendo en cuenta la orientación de las fibras según los tres ejes principales de una probeta cúbica.

El ensayo de doble punzonamiento aplicado sobre probetas cúbicas (MDPT) es un método simple y efectivo para determinar el comportamiento mecánico del CRF en las tres direcciones principales. El ensayo consiste en aplicar una fuerza de compresión a una probeta cubica de  $150 \times 150 \times 150$  mm a través de dos punzones metálicos situados concéntricamente en las caras superior e inferior de dicha probeta. El ensayo se realiza por control de desplazamiento del pistón a través de un sistema de lazo cerrado y se detiene hasta alcanzar un desplazamiento de 8 mm a una velocidad de 0.5 mm/min. En la figura 2.1 se puede observar un esquema del ensayo.

El MDPT se utiliza para obtener varias características y parámetros útiles para caracterizar el comportamiento del CRF. El registro continuo de la carga y el desplazamiento del pistón durante el ensayo, permite obtener la curva carga vs desplazamiento del pistón que describe el comportamiento post-fisuración del material, útil para determinar la carga máxima, carga residual y tenacidad.



**Figura 2.1 Esquema del ensayo MDPT**

Este ensayo es de tensión indirecta, ya que a través de los punzones se transmite una carga de compresión. Dichos punzones generan esfuerzos de tensión desde el centro al exterior de la probeta, que al alcanzar la resistencia a tensión del concreto provocan la fractura. El mecanismo de fractura comienza cuando la presión que ejercen los punzones sobre la probeta provoca la aparición de un perímetro circular en el centro de la cara de aplicación de carga. Bajo este perímetro se genera un cono como resultado de las tensiones transmitidas al concreto. El desplazamiento vertical del cono provoca la aparición de tensiones normales y tangenciales sobre su generatriz. Estas tensiones normales que se producen, fruto del desplazamiento vertical, son las responsables de producir una fuerza de tensión que provoca la fractura de la probeta.

Al aplicar la carga en una de las tres direcciones, solamente las fibras orientadas de acuerdo con la distribución de esfuerzos contribuirán en el comportamiento resistente global de la probeta. Es decir, solo las fibras orientadas perpendicularmente a la dirección de la carga contribuirán a la resistencia del concreto. Como se muestra en la figura 2.2.

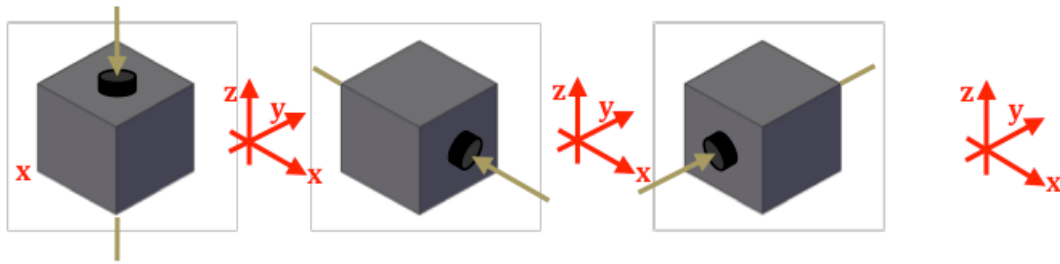


Figura 2.2 Plano de contribución máximo de las fibras para cada dirección de carga

### 2.3 Aplicación del método

Con el objetivo de evaluar la influencia de la orientación de las fibras en el comportamiento post-fisuración del CRF, se planteó implementar la metodología MDPT empleando dos tipos de fibra: de acero y sintética; y diferentes dosificaciones.

Se fabricaron siete mezclas de CRF: tres con fibras de acero y cuatro con fibras sintéticas. Para cada serie se ensayaron probetas cúbicas y probetas cilíndricas. Para el ensayo MDPT se ensayaron 18 cubos de 150 x 150 x 150 mm (6 en cada dirección) y para compresión 3 cilindros de 300 H x 150  $\phi$  mm. Las fibras de acero y sintéticas que se utilizaron fueron suministradas por las empresas Bekaert y Euclid, respectivamente.

En las tablas 2.1 y 2.2 se presentan el alcance del programa con las variables consideradas.

Tabla 2.1 Concreto con fibras de acero Bekaert (Dramix)

Mezcla	Fibra Acero						
	Marca	Tipo	Longitud, L mm	Diámetro, D mm	Esbeltez L/D	Cuantía kg/m <sup>3</sup>	Dosis %
M1	Dramix	RC6535BN	35	0.55	65	40	0.3
M2	Dramix	RC6535BN	35	0.55	65	60	0.5
M3	Dramix	RC6535BN	35	0.55	65	80	0.7

Tabla 2.2 Concreto con fibras sintéticas Euclid (TufStrand SF)

Mezcla	Fibra Sintética				
	Marca	Tipo	Longitud, L mm	Cuantía kg/m <sup>3</sup>	Dosis %
M4	TufStrand SF	TS	51	2	0.3
M5	TufStrand SF	TS	51	5	0.5
M6	TufStrand SF	TS	51	7	0.7
M7	TufStrand SF	TS	51	9	0.9

### 2.3.1 Materiales

Se usó cemento Portland compuesto CPC 40 RS, arena andesita con un módulo de finura de 3.1, grava caliza de 9.5 mm, un aditivo reductor de agua Pozzolih 322 N y agua potable. En el anexo A-1 se presenta la ficha técnica del aditivo. La tabla 2.3 muestra los resultados de las pruebas realizadas en los agregados, y los valores corresponden al promedio de tres pruebas.

Se emplearon dos tipos de fibras, de acero y sintética. Las fibras de acero Bekaert-Dramix (RC6535BN) son filamentos de acero, deformados y cortados en longitudes diferentes, estirados en frío con extremos conformados y encolado en peines. En el anexo A-2, se muestra una ficha técnica de la fibra Dramix RC6535 BN.

La fibra sintética Euclid Tuf-Strand SF es una fibra sintética de una mezcla de polipropileno/polietileno, monofilamento, las cuales se auto fibrilan cuando se incorporan en la mezcla de concreto. Se anexa una ficha técnica de la fibra Tuf-Strand SF (Anexo A-3).

La tabla 2.4 muestra las características de las fibras y en la figura 2.3 una fotografía.

**Tabla 2.3 Propiedades de los materiales**

Característica	Arena	Grava
Densidad	2.2	2.6
Absorción, %	6.79	1.35
Peso volumétrico seco suelto, kg/m <sup>3</sup>	1,250	1,432
Peso volumétrico seco compactado, kg/m <sup>3</sup>	1,395	1,597

**Tabla 2.4 Características de las fibras (Datos del fabricante)**

Tipo de Fibra	L mm	D mm	L/D	R tensión N/mm <sup>2</sup>	Módulo N/mm <sup>2</sup>	# de Fibras por kg
RC6535BN	35	0.55	65	1,345	210,000	14,500
TufStrand SF	51	-	74	600 - 650	9,500	-



**Figura 2.3 Fibras Dramix y TufStrand SF**

### 2.3.2 Fabricación

En este apartado se presentan detalles de proporcionamiento de los materiales así como el procedimiento de fabricación de los concretos.

El diseño de mezclas se llevó a cabo de acuerdo con las recomendaciones del ACI 211.1 (“Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete”). Los parámetros que se utilizaron para el diseño fueron la resistencia a compresión, relación agua/cemento, revenimiento y tamaño de agregado grueso. Para este caso la resistencia deseada fue de 40 MPa, con una relación agua/cemento de 0.5, un tamaño máximo de agregado de 9.5 mm (3/8”) y un revenimiento del orden de 80 mm. En las tablas 2.5 y 2.6 se muestran la dosificación de las mezclas.

**Tabla 2.5 Proporcionamiento de materiales (Fibra de Acero)**

Mezcla	Fibra kg/ m <sup>3</sup>	Cemento kg/m <sup>3</sup>	Grava kg/m <sup>3</sup>	Arena kg/m <sup>3</sup>	Agua kg/m <sup>3</sup>	Aditivo ml/m <sup>3</sup>	Relación a/c
M1	40	428	855	662	214	2560	0.50
M2	60	428	855	662	214	3060	0.50
M3	80	428	855	662	214	3060	0.50

**Tabla 2.6 Proporcionamiento de materiales (Fibra Sintética)**

Mezcla	Fibra kg/m <sup>3</sup>	Cemento kg/m <sup>3</sup>	Grava kg/m <sup>3</sup>	Arena kg/m <sup>3</sup>	Agua kg/m <sup>3</sup>	Aditivo ml/m <sup>3</sup>	Relación a/c
M4	2	428	855	662	214	2770	0.50
M5	5	428	855	662	214	2820	0.50
M6	7	428	855	662	214	3270	0.50
M7	9	428	855	662	214	3545	0.50

El procedimiento de fabricación de los especímenes comenzó con pesar las cantidades de material señaladas en la dosificación haciendo la respectiva corrección de pesos por contenido de humedad y porcentaje de absorción. Para ello se utilizó una báscula y cubetas para almacenar el material ya pesado como se puede observar en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Materiales pesados**

Una vez que los materiales estuvieron pesados, se procedió con la preparación de moldes, es decir, se limpiaron, armaron y se les aplicó una capa de aceite con el objetivo de facilitar el desmoldado.

Para cada serie de mezcla se fabricaron tres probetas cilíndricas de 150 x 300 mm para ensayo a compresión y dieciocho probetas cúbicas de 150 x 150 x 150 mm para el ensayo MDPT. En la tabla 2.7 se presenta un resumen y en la figura 2.5 se muestran los moldes utilizados.

**Tabla 2.7 Especímenes por mezcla**

Tipo de ensayo	ID Ensayo	Número de Probetas	Dimensión Molde, en mm
Multidireccional	MDPT	18	150 x 150 x 150
Compresión	Compresión	3	150 x 300



**Figura 2.5 Moldes prismáticos**

Los concretos se fabricaron utilizando una revolvedora de 0.100 m<sup>3</sup> de capacidad. La fabricación y el procedimiento de mezclado se hicieron de acuerdo con las recomendaciones del ACI. Se inició el procedimiento con la colocación de la grava, arena y el agua de absorción en la revolvedora, dejándose mezclar durante dos minutos para uniformizar la mezcla. Enseguida se incorporó el cemento e inmediatamente el agua restante. Se mezcló todo durante dos minutos y después se dejó un reposo de un minuto para romper el posible falso fraguado. Posteriormente, se reinició el mezclado durante un minuto para después incorporar el aditivo y mezclar por un minuto más. Finalmente, se añadió la fibra dejándose mezclar por dos minutos. En las figuras 2.6 y 2.7 se muestran la incorporación del aditivo y las fibras.

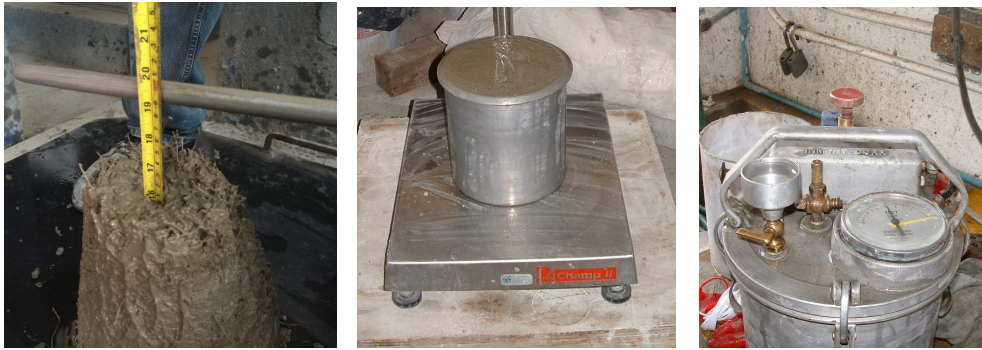


**Figura 2.6 Incorporación de aditivo Pozzolite 322 N**



**Figura 2.7 Adición de fibras a la revolvedora**

Al finalizar el mezclado, se hicieron las pruebas en estado fresco. Primero se realizó la prueba de revenimiento según la norma ASTM C 143 como se muestra en la figura 2.8 y después se realizaron las pruebas de peso unitario y contenido de aire con base en la norma ASTM C138/C138M.



**Figura 2.8 Prueba de revenimiento, peso unitario y contenido de aire**

Después se procedió con el moldeado de los cilindros de 150 x 300 mm y el de la olla para las pruebas de contenido de aire y peso unitario. Su llenado se realizó en tres capas. El resto de los especímenes se moldeó en dos capas. La compactación se hizo en una mesa de vibrado durante 25 segundos por cada capa. En la figura 2.9 se muestra el moldeado y vibrado de algunos moldes. Finalmente se realizó el enrase de los especímenes procurando dejar una superficie lisa.







**Figura 2.9 Moldeado y vibrado de especímenes**

Todos los especímenes fueron desmoldados a las 24 horas de haberse colado. Se almacenaron en la cámara húmeda bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa (23°C, 95% HR), de acuerdo con la norma ASTM C31/C31M. Los especímenes permanecieron ahí durante 28 días para después ser ensayados.

Los cilindros de 150 x 300 mm para ensayos a compresión requirieron una preparación previa a su ensayo. El ensayo de resistencia a compresión, se realizó de acuerdo con la norma ASTM C39 para lo cual los cilindros necesitaron ser cabeceados con azufre para eliminar las posibles irregularidades de acabado y así asegurar la distribución uniforme de la carga al momento de aplicar la carga. El cabeceado se realiza de acuerdo con la norma ASTM C617.

Para realizar el ensayo de compresión se utilizó una prensa universal modelo SATEC con capacidad de 2.2 MN. La velocidad del ensayo fue de 250 kN/min.

### Capítulo 3. Resultados

En este capítulo se exponen los resultados de los principales ensayos que se realizaron así como el análisis de los mismos.

#### 3.1 Peso unitario, revenimiento y contenido de aire

Como ya se mencionó, a cada mezcla se le realizaron las pruebas en estado fresco de revenimiento, contenido de aire y peso unitario. La tabla 3.1 muestra los resultados de estas pruebas para cada una de las mezclas fabricadas.

Tabla 3.1 Resultados de pruebas en estado fresco

ID	Fibra Dramix RC6535 kg/m <sup>3</sup>			Fibra TufStrand SF kg/m <sup>3</sup>			
	M1-40	M2- 60	M3-80	M4-2	M5-5	M6-7	M7-9
PU kg/m <sup>3</sup>	2364	2281	2150	2985	2369	2371	2169
Rev cm	8.6	7.9	8.9	10.3	8.8	7.2	8.0
% Aire	3.2	3.0	3.5	3.8	2.2	3.2	3.8

La incorporación de fibras en el concreto no influye de forma significativa, es decir, los resultados obtenidos de revenimiento, contenido de aire y peso unitario son comparables a los valores que se obtiene en concretos convencionales (sin fibra).

#### 3.2 Ensayo de resistencia a compresión

Para obtener los resultados de resistencia a compresión se ensayaron 21 probetas de 150 x 300 mm en total, 3 probetas por serie. En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran los resultados promedio para las mezclas con fibras metálicas y sintéticas respectivamente.

Tabla 3.2 Resultados promedio de resistencia a compresión (fibra metálica)

ID-kg/m <sup>3</sup>	Edad días	Fibra de acero		
		f <sub>c</sub> MPa	Desv Est MPa	C. V. %
M1-40	28	42	7.22	1.71
M2-60	28	42	8.19	1.95
M3-80	28	41	18.23	4.43
<b>Promedio</b>	<b>28</b>	<b>41.7</b>	<b>11.23</b>	<b>2.69</b>

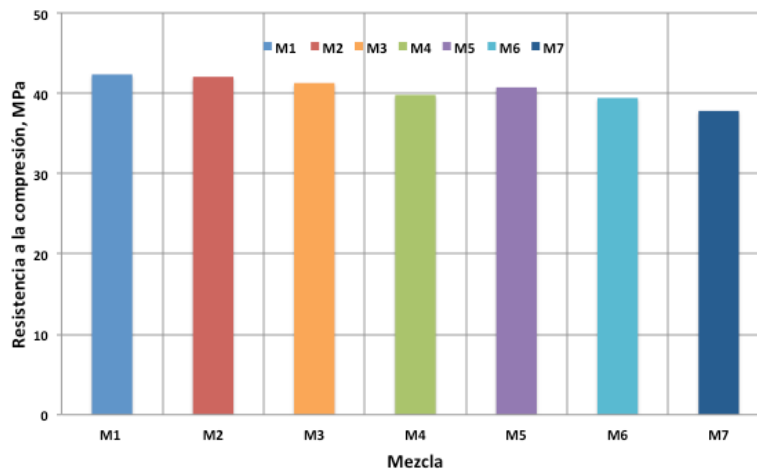
**Tabla 3.3 Resultados promedio de resistencia a compresión (fibra sintética)**

ID- kg/m <sup>3</sup>	Edad días	Fibra sintética		
		f <sub>c</sub> , MPa	Desv Est MPa	C. V. %
M4-2	28	40	7.42	1.87
M5-5	28	41	6.36	1.56
M6-7	28	39	9.44	2.39
M7-9	28	38	26.84	7.10
<b>Promedio</b>	<b>28</b>	<b>39</b>	<b>12.51</b>	<b>3.23</b>

A pesar de que el contenido y el tipo de fibra fueron diferentes para cada mezcla, se puede decir que estos parámetros no afectan la resistencia a compresión, ya que los resultados son muy similares para todos los casos, como se muestra en la figura 3.1.

Se puede concluir que la resistencia a compresión depende de la resistencia de la matriz y de la edad de ensayo pero no del contenido o tipo de fibra.

El aporte de las fibras se ve reflejado a partir de la aparición de las primeras fisuras en las probetas.



**Figura 3.1 Resistencia a compresión promedio**

### 3.3 Ensayo Multidireccional de Doble Punzonamiento (MDPT)

#### 3.3.1 Generalidades

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para el ensayo se utilizó un equipo MTS con celda de carga de capacidad de 50 Ton, como se muestra en la figura 3.2. Durante el ensayo se midió la carga y desplazamiento del pistón. Adicionalmente, se colocaron 4 LVDTs verticales para comprobar las lecturas del desplazamiento del pistón. Y con el objetivo de obtener

información adicional de la abertura de fisura, se instalaron otros cuatro LVDTs colocados en posición horizontal a media altura de cada cara de la probeta.

Las señales de carga, desplazamiento del pistón, desplazamiento axial y abertura de fisura se almacenaron durante todo el ensayo por un sistema de adquisición de datos. El control del ensayo fue por desplazamiento del pistón a una velocidad constante igual a 0.5 mm/min.



Figura 3.2 Equipo MTS y montaje de ensayo MDPT

En total se realizaron 126 ensayos MDPT, 54 con fibras de acero y 72 con fibras sintéticas, seis ensayos en cada dirección (X, Y y Z). Previamente a la realización del ensayo MDPT, las probetas se identificaron, estableciéndose el siguiente criterio, se asocia el eje Z a la cara del colado y los ejes Y y X al resto de las caras como se muestra en la siguiente figura 3.3.

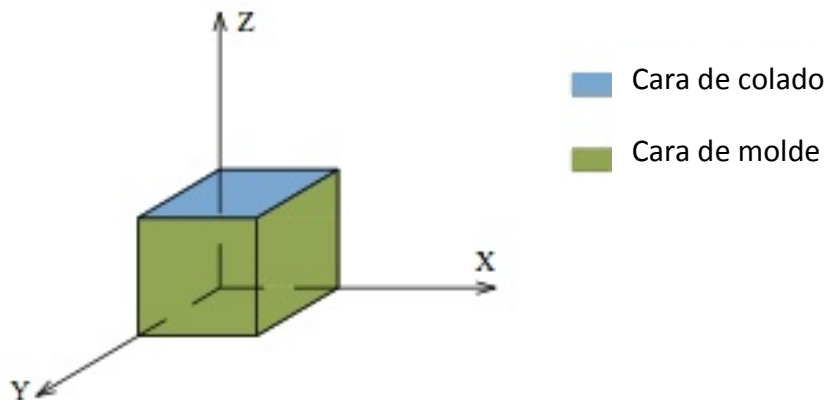


Figura 3.3 Orientación de los ejes en las probetas

### 3.3.2 Modo de falla

El modo de falla del ensayo MDPT depende de la dirección de la aplicación de la carga. Cuando la carga se aplica en la dirección Z, se forman tres o cuatro grietas, mientras que cuando se aplica la carga en las direcciones X y Y, se presentan dos grietas. En general, las grietas sobre las caras de carga X y Y se forman al centro de la cara de carga, mientras

que las de la dirección Z son radiales y aproximadamente equidistantes una de otra. Todas inician en la cara de carga y atraviesa la altura de la probeta.

La figura 3.3 muestra el modo de falla típico observado en las probetas en cada dirección de carga.

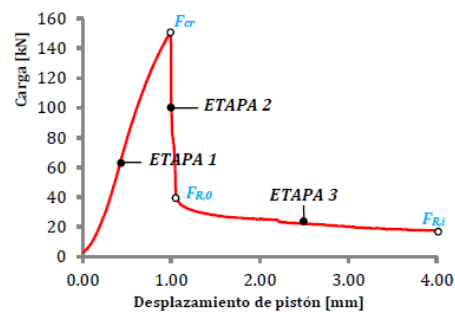


**Figura 3.3** Modo de falla ensayo MDPT

### **3.3.3 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón**

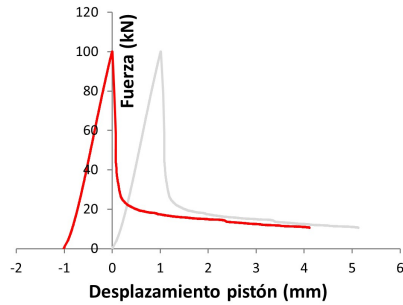
En el ensayo multidireccional MDPT se identifican 3 etapas, como se muestra en la figura 3.4, claramente diferenciadas:

- 1) fase elástica lineal
- 2) fase de transición
- 3) fase o rama residual



**Figura 3.4** Esquema del ensayo MDPT

Debido a que el interés principal del análisis radica en el estudio de la rama residual, se debe realizar un ajuste de los gráficos obtenidos del ensayo. Con ello se tomará como inicio de desplazamiento del pistón el punto de carga máxima, ya que en ese punto se produce la ruptura e inicia el comportamiento post-fisuración de la probeta. En la figura 3.5 se muestra el ajuste de la curva de forma gráfica.



**Figura 3.5 Ensayo MDPT, curva con desplazamiento en el origen**

En las figuras 3.6 a 3.11 se presentan las curvas fuerza y tenacidad versus desplazamiento del pistón de los ensayos MDPT de las probetas de los concretos con fibras de acero y sintéticas.

En general, las curvas fuerza versus desplazamiento del pistón presentan un comportamiento comparable para todas las series de concreto, independientemente del tipo de fibra empleada y la dirección de la carga. Las curvas se caracterizan por presentar un primer tramo lineal ascendente hasta alcanzar la carga máxima; en este estado la probeta no presenta fisuración. Después de la carga máxima aparecen las primeras fisuras en la probeta y se presenta el régimen del post-fisuración donde las probetas experimentan un ablandamiento. La carga disminuye bruscamente para mantenerse hasta que la abertura de fisura aumenta y empiezan a trabajar las fibras. En el caso de las fibras metálicas ensayadas en el eje Z, la caída que se produce tras la rotura resulta más moderada y la reducción en la resistencia se produce de modo más paulatino.

El valor de carga residual que se alcanza en cada caso, como se observa, depende del tipo y contenido de fibra en la mezcla.

La tenacidad es un término mecánico que se utiliza en varios contextos; en un sentido amplio, es una medida de la capacidad de un material para absorber energía hasta llegar al punto de fractura. Para este ensayo, la tenacidad se define como el área bajo la curva carga vs desplazamiento del pistón se mide en Joules ( $N \times m$ ) y representa la energía absorbida por la probeta durante el ensayo. Su valor depende del tipo y contenido de fibra en la mezcla.

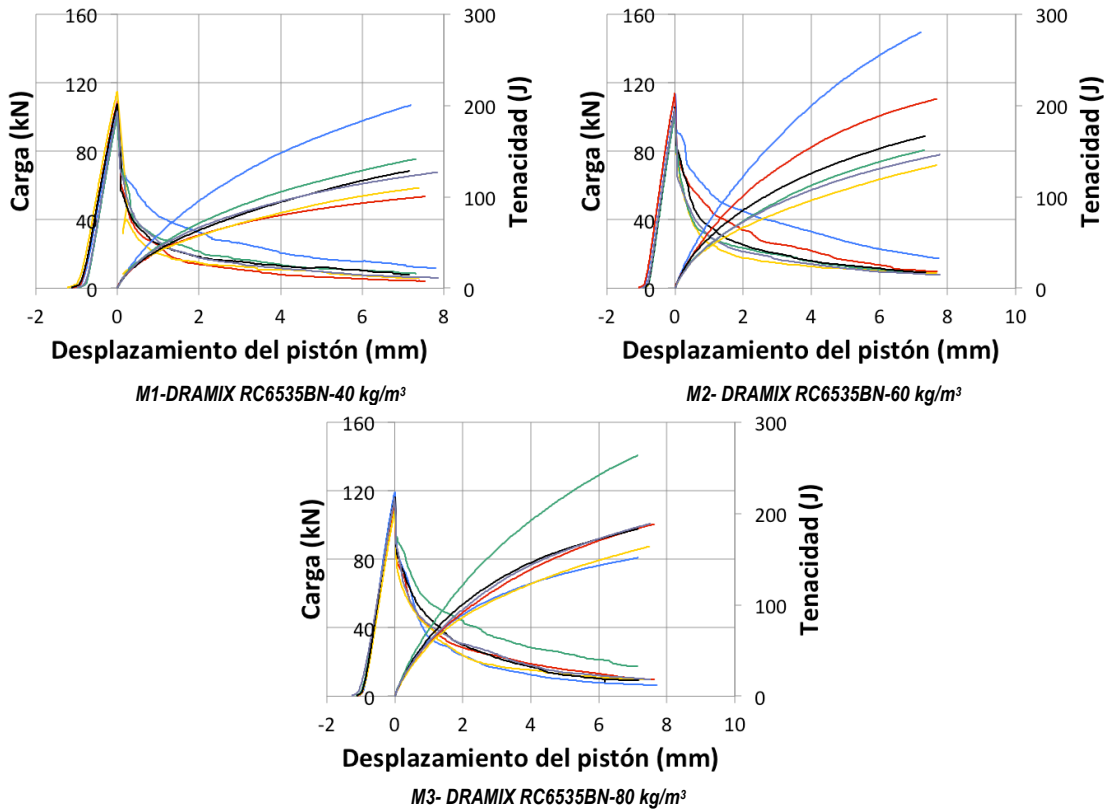


Figura 3.6 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón - MDPT- fibra de acero- Eje X

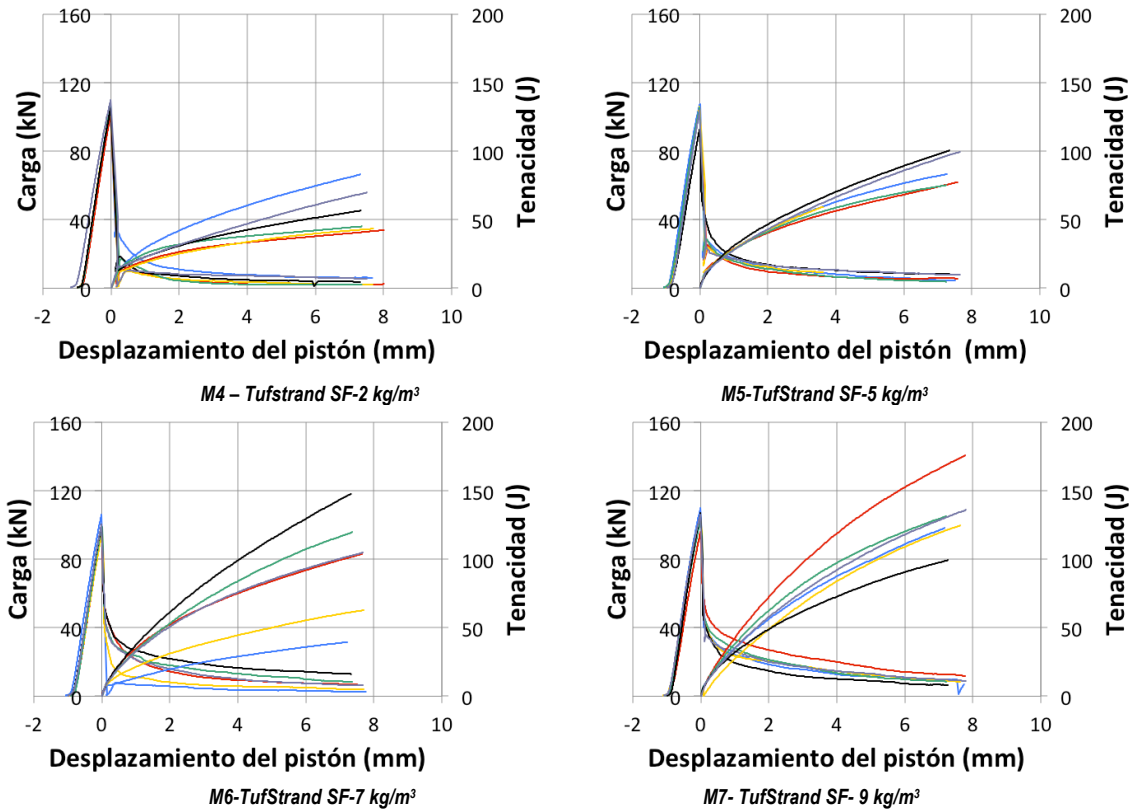


Figura 3.7 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón - MDPT- fibra sintética- Eje X

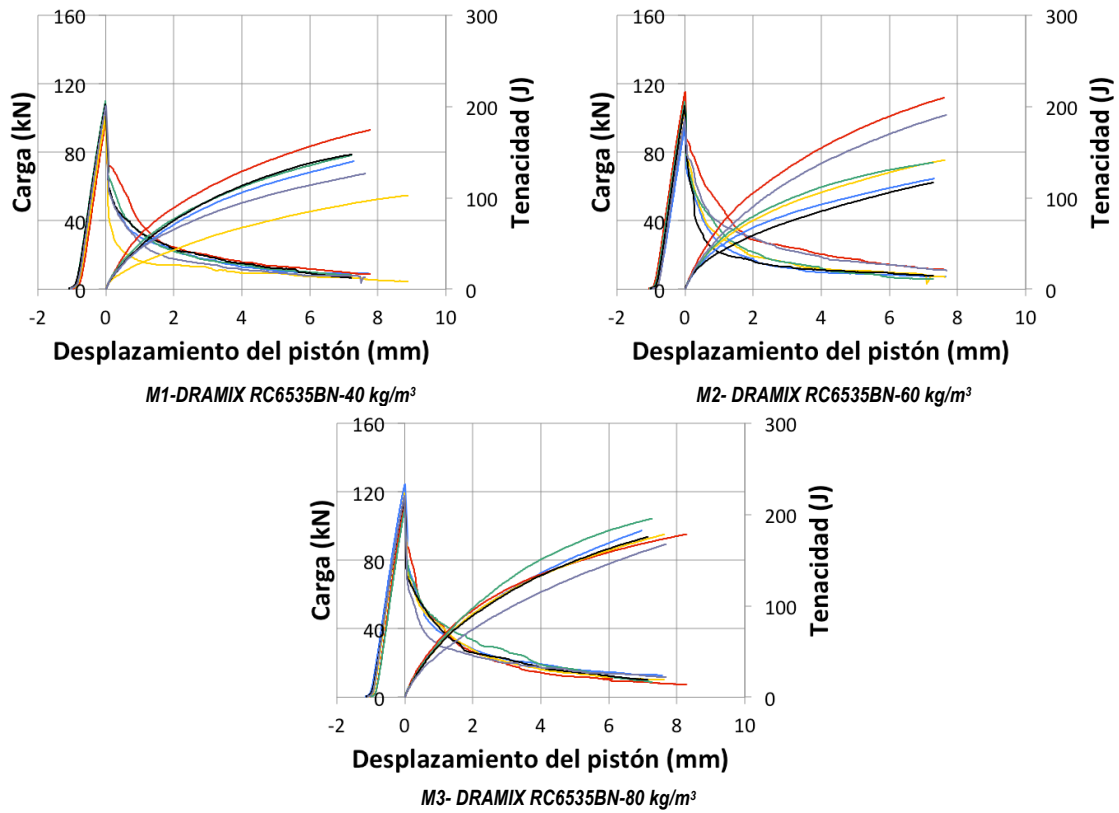


Figura 3.8 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón- MDPT- fibra de acero- Eje Y

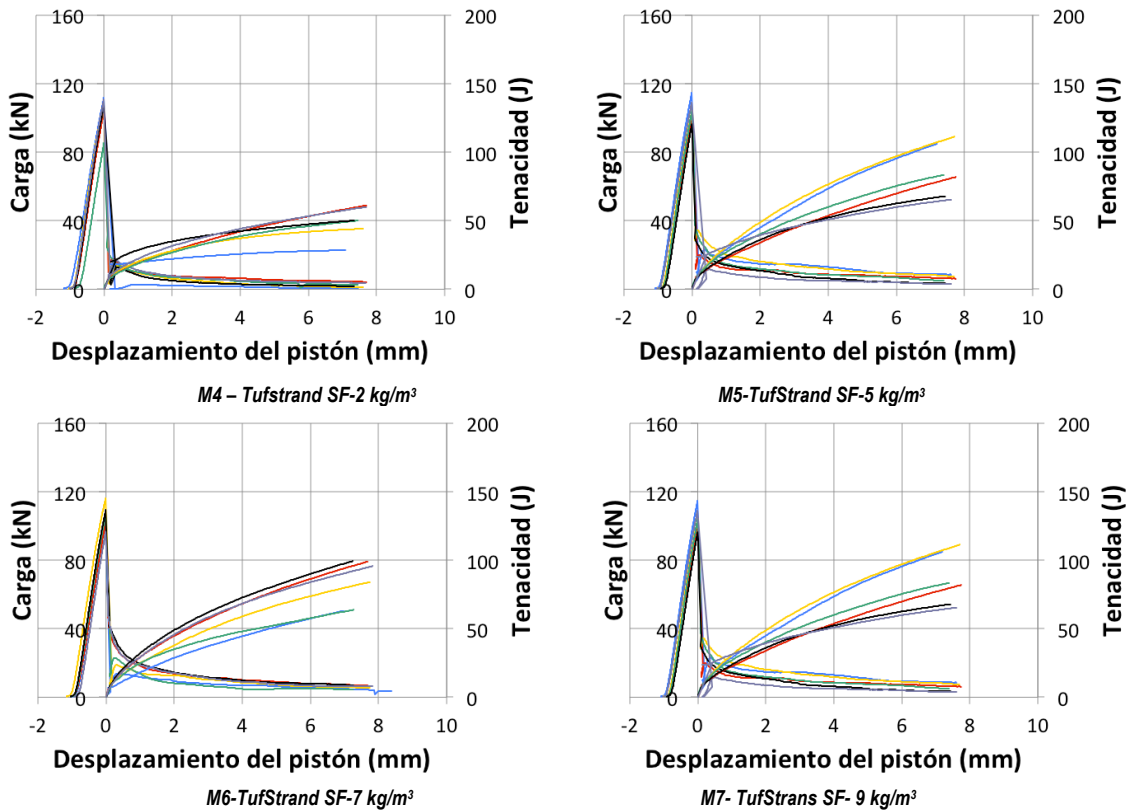


Figura 3.9 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón- MDPT- fibra sintética- Eje Y



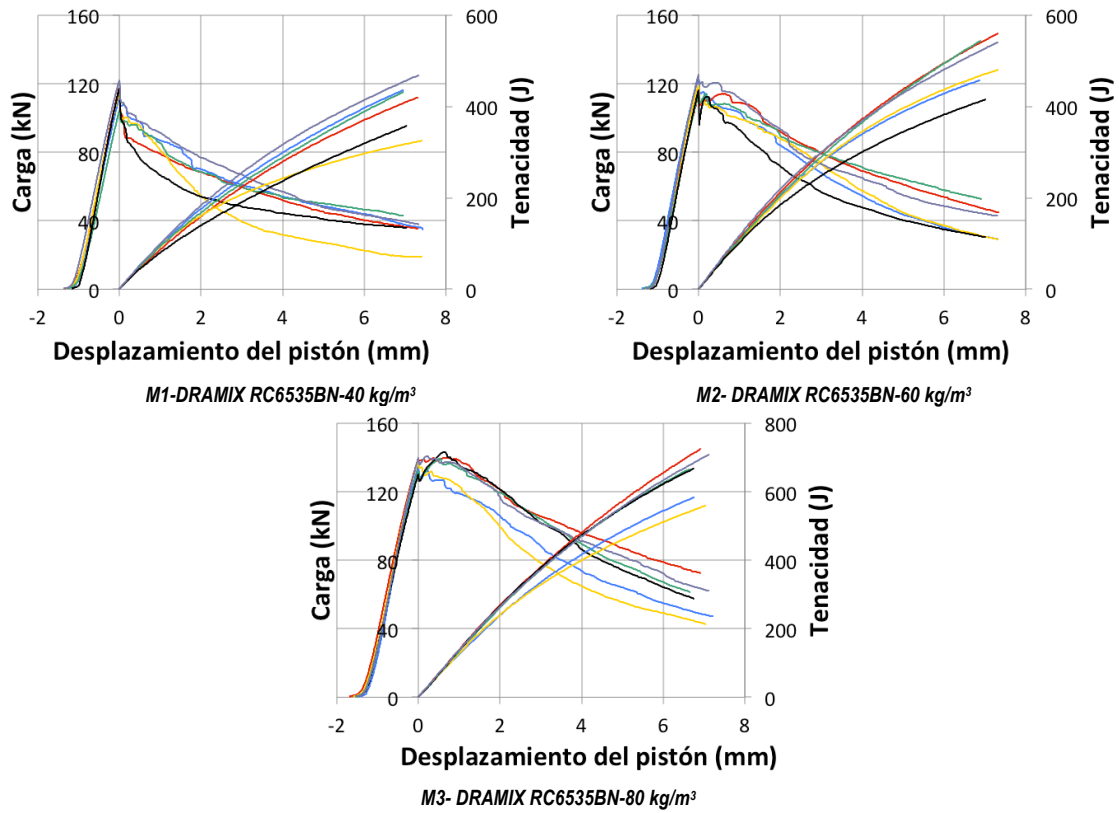


Figura 3.10 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón - MDPT- fibra de acero- Eje Z

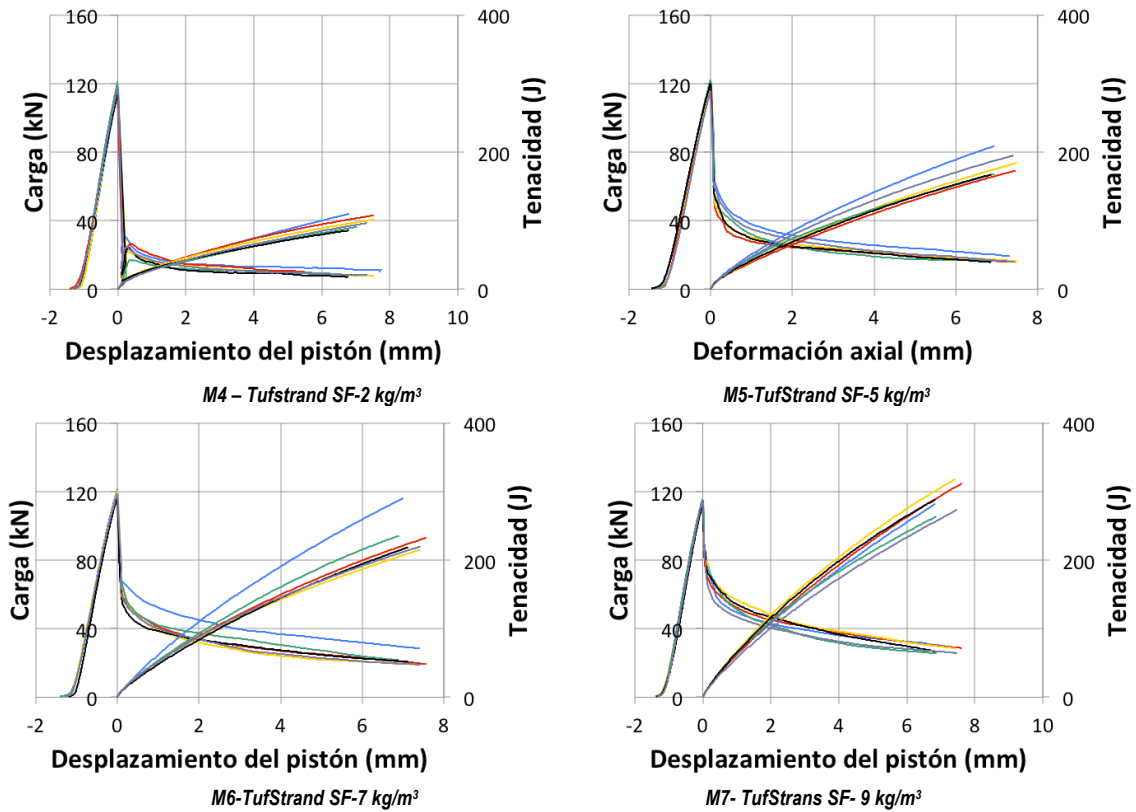


Figura 3.11 Curvas fuerza y tenacidad vs desplazamiento del pistón - MDPT- fibra sintética- Eje Z

### 3.3.4 Análisis de resultados

#### 3.3.4.1 Carga máxima

En las tablas 3.4 y 3.5 se muestran los resultados de carga máxima obtenidos del ensayo MDPT, para las tres direcciones de ensayo. Los resultados muestran la influencia de la orientación de las fibras en la matriz del concreto dependiendo la dirección de la carga. Como se puede observar en la figura 3.12, los resultados de carga máxima son mayores cuando la carga se aplica en dirección Z, correspondiente a la cara del colado.

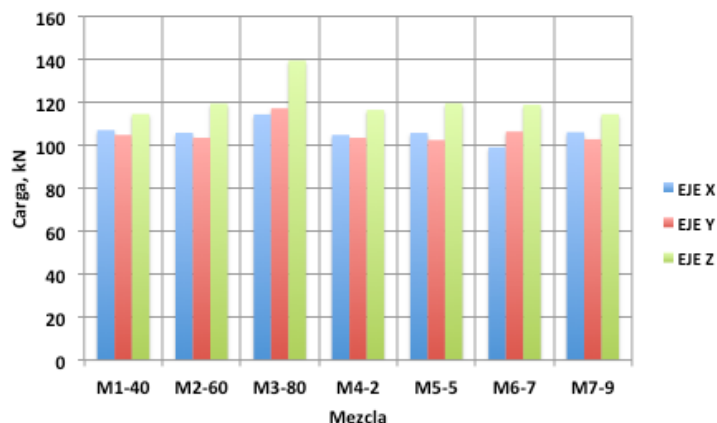
La variabilidad de los resultados es aceptable, menor a 11 % en todos los casos. Para los resultados en el eje X la variabilidad estuvo entre 1.3 y 5.1%, entre 4.8 y 10.2% para los resultados en el eje Y, y entre 1.1 y 5.9 % para los resultados en el eje Z.

Tabla 3.4 Resultados de carga máxima (Fibra de acero)

Carga Máxima						
MDPT	Fibra Dramix RC6535BN					
	EJE X		EJE Y		EJE Z	
ID-kg/m <sup>3</sup>	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
M1-40	107.04	5.07	104.78	4.99	114.55	5.90
M2-60	105.79	4.62	103.46	5.97	119.36	4.22
M3-80	114.35	3.47	117.17	4.10	139.41	2.29
<b>Promedio</b>	<b>109.06</b>		<b>108.47</b>		<b>124.44</b>	
<b>Desv est</b>	<b>4.63</b>		<b>7.56</b>		<b>13.19</b>	
<b>C.V. %</b>	<b>4.24</b>		<b>6.97</b>		<b>10.60</b>	

Tabla 3.5 Resultados de carga máxima (Fibra sintética)

Carga Máxima						
MDPT	Fibra TufStrand SF					
	EJE X		EJE Y		EJE Z	
ID-kg/m <sup>3</sup>	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
M4-2	104.80	2.11	103.45	10.19	116.43	2.21
M5-5	105.75	1.35	102.41	4.80	119.48	2.27
M6-7	99.05	4.84	106.37	6.82	118.77	1.13
M7-9	106.08	2.60	102.80	7.99	114.47	1.07
<b>Promedio</b>	<b>103.92</b>		<b>103.76</b>		<b>117.29</b>	
<b>Desv est</b>	<b>3.29</b>		<b>1.80</b>		<b>2.29</b>	
<b>C.V. %</b>	<b>3.17</b>		<b>1.73%</b>		<b>1.95</b>	



**Figura 3.12 Comparación de cargas máximas**

En las tablas 3.6 y 3.7 se muestran la relación que existe entre los valores de carga máxima obtenidas en las diferentes condiciones de carga.

En todos los casos la relación que existe entre los valores de carga máxima obtenidos del ensayo en la dirección Z con respecto a las direcciones Y y X, es mayor del 10%. En el caso de las series con fibras de acero, esta relación es mayor a medida que se incrementa la dosis de fibra. Para la relación entre cargas de los ejes Z/X esta relación varió entre 1.1 y 1.2, mientras que para la relación Z/Y varió entre 1.1 y 1.2 para las series M1 y M3 de fibra de acero, respectivamente. En las series con fibra sintética, los resultados son variables, no hay tendencia definida. Además, los resultados de carga máxima en las direcciones X y Y son bastante similares. La relación de cargas máximas Y/X para las series de fibra de acero M1 a M3, fue en promedio cercana a 1.0. Lo mismo ocurre para las series de fibra sintética M4 a M7 con valor promedio cercano a 0.98, a excepción de la serie M6, que fue de 1.1.

**Tabla 3.6 Relación entre cargas máximas MDPT- Fibra acero –Ejes X, Y y Z**

Fibra de acero Dramix RC6535BN						
MDPT	Carga máxima			Relación		
ID-kg/m <sup>3</sup>	Z	Y	X	Z/X	Z/Y	Y/X
<b>M1-40</b>	114.55	104.78	107.04	1.07	1.09	0.98
<b>M2-60</b>	119.36	103.46	105.79	1.13	1.15	0.98
<b>M3-80</b>	139.41	117.17	114.35	1.22	1.19	1.02

**Tabla 3.7 Relación entre cargas máximas MDPT- Fibra sintética –Ejes X, Y y Z**

Fibra sintética TufStrand SF						
MDPT	Carga máxima			Relación		
ID-kg/m <sup>3</sup>	Z	Y	X	Z/X	Z/Y	Y/X
M4-2	116.43	103.45	104.80	1.11	1.13	0.99
M5-5	119.48	102.41	105.75	1.13	1.17	0.97
M6-7	118.77	106.37	99.05	1.20	1.12	1.07
M7-9	114.47	102.80	106.08	1.08	1.11	0.97

### 3.3.4.2 Carga residual

En las tablas 3.8 a 3.13 se presentan los resultados de carga residual para los valores de desplazamiento de 2.0, 2.5, 4.0 y 6.0 mm para los concretos con fibras de acero y sintéticas. Como puede observarse, el coeficiente de variación de los resultados en las tres direcciones es variable, sin embargo, es menor en la dirección Z, en general, con valores menores de 15%, mientras que en las direcciones Y y X la variabilidad estuvo comprendida entre 5 y 38% y entre 4 y 42%, respectivamente.

**Tabla 3.8 Resultados de resistencia residual (Fibra de acero) – EJE X**

MDPT	EJE X					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
P	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
P, max	107.04	5.07	105.79	4.62	114.35	3.47
P 2 mm	17.36	17.42	24.37	24.81	27.35	11.97
P 2.5 mm	15.39	16.40	21.40	20.72	23.79	16.09
P 4 mm	11.44	20.36	16.06	21.72	16.37	15.09
P 6 mm	8.26	25.69	11.16	14.40	10.87	18.89

**Tabla 3.9 Resultados de resistencia residual (Fibra sintética) – EJE X**

MDPT	EJE X							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
P	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
P, max	104.80	2.11	105.75	1.35	99.05	4.84	106.08	2.60
P 2 mm	5.52	22.47	11.84	12.17	12.49	41.85	19.02	13.45
P 2.5 mm	4.69	27.09	10.49	11.72	11.16	42.49	17.21	14.94
P 4 mm	3.34	37.12	8.25	20.62	8.45	43.52	13.19	14.57
P 6 mm	2.22	5.39	6.85	29.19	6.63	38.81	9.99	15.38

**Tabla 3.10 Resultados de resistencia residual (Fibra de acero) – EJE Y**

MDPT	EJE Y					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
P	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
P, max	104.78	4.99	103.46	5.97	117.17	4.10
P 2 mm	22.14	11.95	21.04	25.70	27.67	11.61
P 2.5 mm	19.64	11.57	17.83	28.39	24.28	10.93
P 4 mm	13.91	13.33	12.84	26.88	17.32	10.38
P 6 mm	9.81	14.09	9.78	27.96	12.57	11.72

**Tabla 3.11 Resultados de resistencia residual (Fibra sintética) – EJE Y**

MDPT	EJE Y							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
P	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
P, max	103.45	10.19	102.41	4.80	106.37	6.82	102.80	7.99
P 2 mm	6.79	17.71	11.44	28.35	12.62	20.46	18.36	16.58
P 2.5 mm	6.07	21.57	10.47	30.14	11.35	20.22	17.01	17.59
P 4 mm	4.46	32.45	8.05	32.08	8.44	25.09	14.07	19.27
P 6 mm	3.24	42.20	6.33	34.14	6.86	18.58	11.67	28.78

**Tabla 3.12 Resultados de resistencia residual (Fibra de acero) – EJE Z**

MDPT	EJE Z					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
P	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
P, max	114.55	5.90	119.36	4.22	139.41	2.29
P 2 mm	67.49	12.30	89.36	4.20	116.92	5.53
P 2.5 mm	62.92	12.05	80.98	4.69	107.44	5.84
P 4 mm	52.15	9.09	63.48	11.42	87.20	9.47
P 6 mm	42.38	7.89	46.67	20.96	67.50	13.32

**Tabla 3.13 Resultados de resistencia residual (Fibra sintética) – EJE Z**

MDPT	EJE Z							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
P	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %	kN	C.V. %
P, max	116.43	2.21	119.30	2.51	118.77	1.13	114.47	1.07
P 2 mm	13.25	11.99	26.03	7.28	34.02	5.86	44.29	6.69
P 2.5 mm	12.56	12.48	24.47	6.44	31.94	6.70	41.61	6.20
P 4 mm	11.02	12.30	21.08	5.95	26.88	9.00	35.50	7.80
P 6 mm	9.38	16.92	17.81	4.47	22.20	5.99	30.22	7.76

En la figuras 3.13 a 3.15 se muestran la evolución de los resultados. Como era de esperarse, la carga residual se incrementa a medida que se incrementa la dosis de fibra en el concreto. Con respecto a la influencia de dirección de la carga, se obtuvieron mayores

valores cuando se aplicó la carga en la dirección Z, mientras que los valores en las direcciones X y Y son bastante similares.

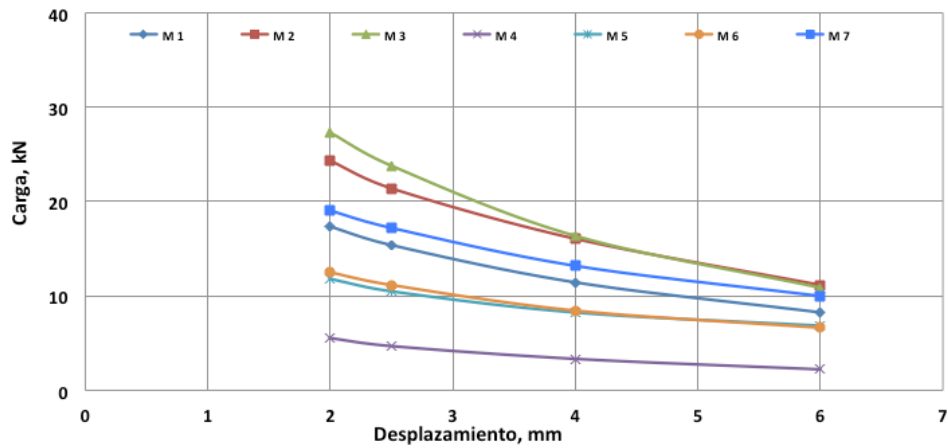


Figura 3.13 Evolución de la resistencia residual de los resultados del ensayo MDPT-EJE X

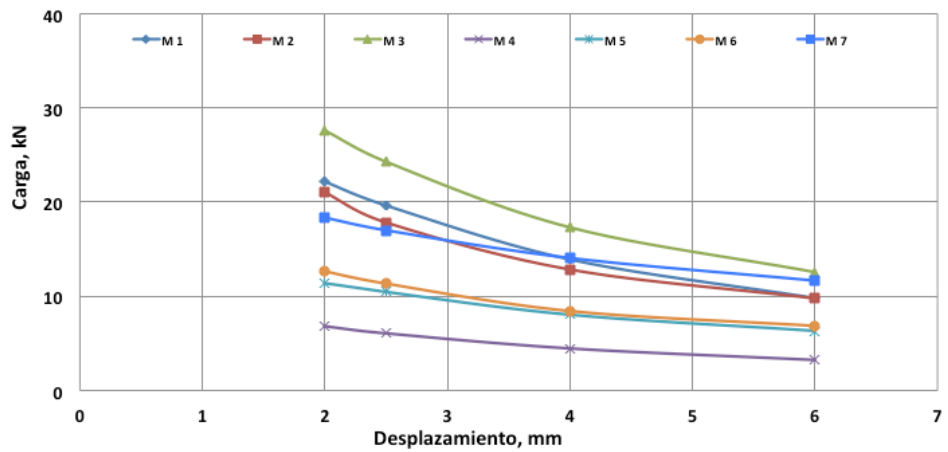


Figura 3.14 Evolución de la resistencia residual de los resultados del ensayo MDPT-EJE Y

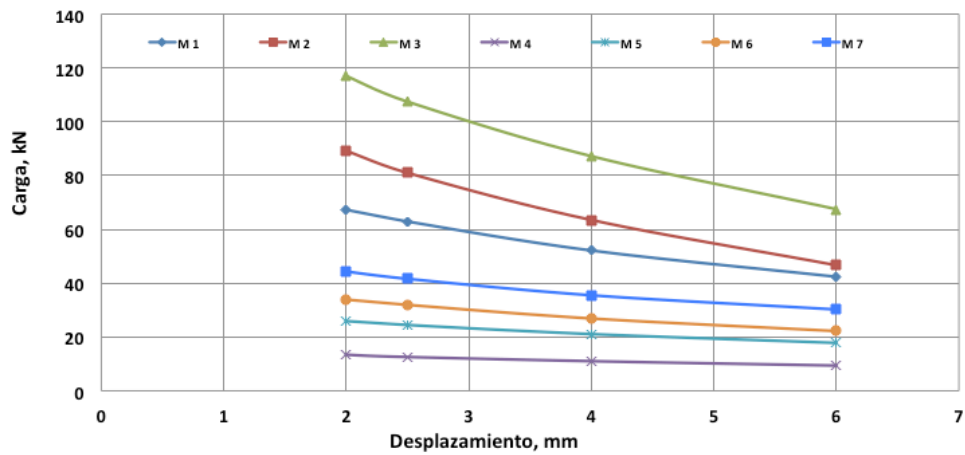


Figura 3.15 Evolución de la resistencia residual de los resultados del ensayo MDPT-EJE Z

### 3.3.4.3 Tenacidad

En las tablas 3.14 a 3.19 se muestran los resultados de tenacidad para los valores de desplazamiento de 2.0, 2.5, 4.0 y 6.0 mm de las tres direcciones de carga para las series de concreto con fibras de acero y sintética, respectivamente. Los resultados muestran la misma tendencia que los resultados de carga residual, es decir, el valor de la tenacidad aumenta a medida que se incrementa la dosis de fibra, para los mismos valores de desplazamiento.

De acuerdo con los resultados, los valores de tenacidad son diferentes para cada concreto. En la figuras 3.16 a 3.18 se puede observar que los valores de tenacidad son mayores para los concretos con fibra de acero. Los resultados de tenacidad cuando la carga se aplica en la dirección Z son mayores a los obtenidos en las direcciones Y y X.

**Tabla 3.14 Resultados de tenacidad (Fibra de acero) – EJE X**

MDPT	EJE X					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	63.20	9.21	79.61	17.36	92.46	5.88
T2.5 mm	71.27	9.89	91.12	18.09	105.22	6.64
T4 mm	91.32	11.37	119.11	18.79	134.83	8.26
T6 mm	110.95	12.73	145.81	18.36	161.19	8.80

**Tabla 3.15 Resultados de tenacidad (Fibra sintética)- EJE X**

MDPT	EJE X							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	28.61	11.67	41.97	2.73	41.38	36.76	54.77	10.80
T2.5 mm	31.16	11.18	47.55	3.76	47.30	37.27	63.85	10.57
T4 mm	36.94	11.65	60.78	6.42	61.63	38.42	86.59	10.73
T6 mm	42.81	13.88	72.01	13.61	76.66	38.86	109.67	10.63

**Tabla 3.16 Resultados de tenacidad (Fibra de acero) – EJE Y**

MDPT	EJE Y					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	75.38	11.72	74.26	16.07	89.50	9.17
T2.5 mm	85.76	11.47	83.91	17.19	102.42	8.95
T4 mm	110.73	11.32	106.60	18.96	133.57	8.50
T6 mm	134.20	11.53	128.85	19.51	163.07	7.38

**Tabla 3.17 Resultados de tenacidad (Fibra sintética)- EJE Y**

MDPT	EJE Y							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	29.80	11.18	39.64	14.43	42.39	13.62	54.90	11.99
T2.5 mm	33.00	9.12	45.13	15.17	48.41	14.17	63.72	12.61
T4 mm	40.87	6.95	58.62	18.05	63.19	15.56	86.99	13.78
T6 mm	48.34	10.08	72.88	20.27	78.26	16.63	112.36	15.79

**Tabla 3.18 Resultados de tenacidad (Fibra de acero) – EJE Z**

MDPT	EJE Z					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	164.97	10.19	207.68	3.91	259.57	4.60
T2.5 mm	197.74	10.44	250.21	3.59	315.52	4.79
T4 mm	283.80	10.48	357.88	4.15	461.32	5.61
T6 mm	377.41	9.64	466.53	6.83	615.48	6.87

**Tabla 3.19 Resultados de tenacidad (Fibra sintética)- EJE Z**

MDPT	EJE Z							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
Tenacidad	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %	Joules	C.V. %
T2 mm	43.56	5.98	71.23	7.38	88.32	3.70	110.67	5.8
T2.5 mm	49.83	6.50	83.83	7.01	104.83	3.89	132.15	5.8
T4 mm	66.84	7.17	117.94	6.03	148.67	4.91	189.72	5.9
T6 mm	86.13	6.85	156.52	5.44	197.53	5.53	255.27	6.1

La variabilidad de los resultados de tenacidad en los ejes X e Y son elevadas, siendo mayor para el caso de las fibras sintéticas. En el caso de las series con fibras de acero el mayor valor fue de 18.8 y 19.5% en el eje X e Y, respectivamente, mientras que para las series de fibra sintética fue de 38.9 y 20.3%, para los mismos ejes. En el caso de los resultados en el eje Z, la variabilidad estuvo entre 4.6 y 10.5% para las series con fibra de acero y entre 3.7 y 7.2% para las fibras sintéticas.



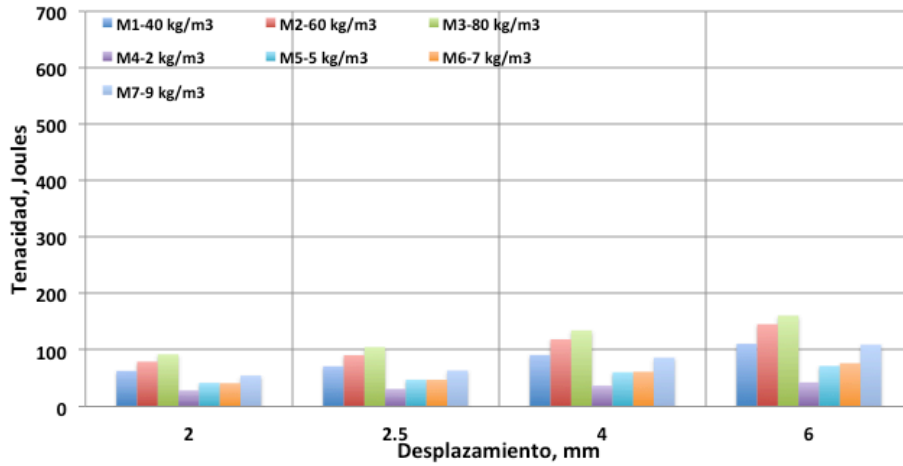


Figura 3.16 Resultados de tenacidad del ensayo MDPT- Eje X

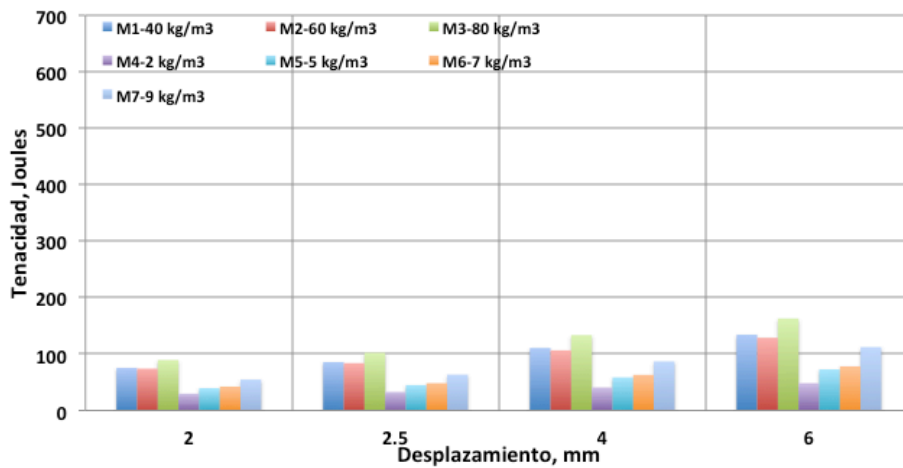


Figura 3.17 Resultados de tenacidad del ensayo MDPT- Eje Y

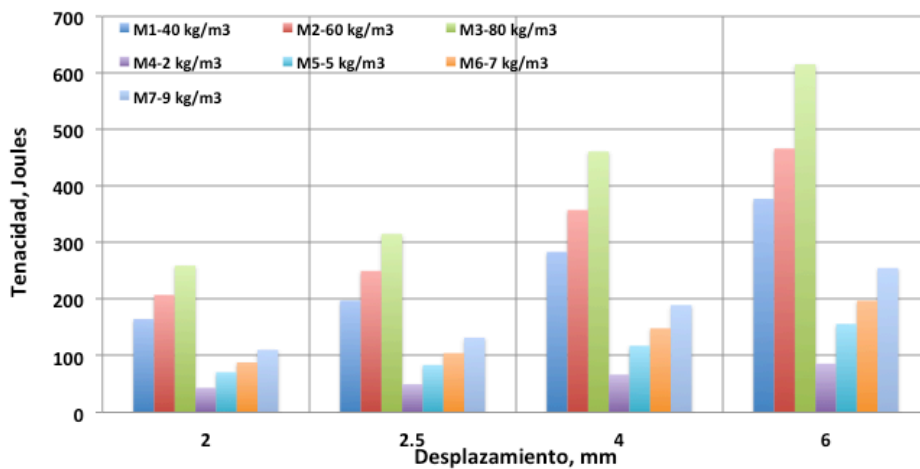


Figura 3.18 Resultados de tenacidad del ensayo MDPT- Eje Z

### 3.3.4.4 Abertura de fisura

En las tablas 3.20 a 3.25 se muestran las aberturas registradas del ensayo MDPT, en las tres direcciones de carga. La base de comparación para el registro de las aberturas fue el desplazamiento del pistón. De esta manera, las lecturas se hicieron a 2, 2.5 4 y 6 mm de desplazamiento del pistón.

**Tabla 3.20 Resultados de abertura de fisura (Fibra de acero) – EJE X**

MDPT	EJE X					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
Pistón	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %
2 mm	4.34	12.60	4.10	10.86	4.18	10.43
2.5 mm	4.91	12.27	4.68	11.15	4.83	9.86
4 mm	6.53	12.79	6.36	12.83	6.78	8.67
6 mm	8.53	14.08	8.46	13.91	9.28	8.14

**Tabla 3.21 Resultados de abertura de fisura (Fibra sintética)- EJE X**

MDPT	EJE X							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
Pistón	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %
2 mm	6.71	13.01	5.15	7.73	4.75	6.17	4.57	12.11
2.5 mm	7.60	12.66	5.83	7.75	5.37	5.53	5.23	11.95
4 mm	9.93	11.42	7.72	8.72	7.13	4.56	7.14	12.22
6 mm	12.51	10.19	10.08	9.98	9.39	4.39	9.55	12.34

**Tabla 3.22 Resultados de abertura de fisura (Fibra de acero) – EJE Y**

MDPT	EJE Y					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
Pistón	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %
2 mm	4.23	9.76	3.77	8.34	4.13	9.67
2.5 mm	4.80	9.81	4.32	7.39	4.73	9.82
4 mm	6.38	9.56	5.87	4.64	6.46	9.04
6 mm	8.35	8.24	7.81	5.59	8.73	8.02

**Tabla 3.23 Resultados de abertura de fisura (Fibra sintética)- EJE Y**

MDPT	EJE Y							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
Pistón	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %
2 mm	7.75	13.07	5.13	13.72	5.08	11.70	4.49	11.75
2.5 mm	8.68	13.85	5.79	13.34	5.69	11.32	5.13	12.11
4 mm	11.17	14.50	7.61	12.02	7.42	10.58	6.94	13.07
6 mm	13.95	14.63	9.90	10.35	9.46	10.85	9.13	13.73

Tabla 3.24 Resultados de abertura de fisura (Fibra de acero) – EJE Z

MDPT	EJE Z					
	M1-40 kg/m <sup>3</sup>		M2-60 kg/m <sup>3</sup>		M3-80 kg/m <sup>3</sup>	
Pistón	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %
2 mm	2.63	15.36	2.76	10.94	2.24	11.86
2.5 mm	3.00	16.07	3.28	12.79	2.67	12.16
4 mm	4.07	17.99	4.68	15.68	3.89	12.47
6 mm	5.50	18.97	6.34	17.05	5.45	12.87

Tabla 3.25 Resultados de abertura de fisura (Fibra sintética)- EJE Z

MDPT	EJE Z							
	M4-2 kg/m <sup>3</sup>		M5-5 kg/m <sup>3</sup>		M6-7 kg/m <sup>3</sup>		M7-9 kg/m <sup>3</sup>	
Pistón	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %	mm	C.V. %
2 mm	5.10	14.61	4.29	12.90	3.61	12.75	3.65	12.80
2.5 mm	5.73	13.58	4.78	13.29	4.08	13.34	4.18	13.72
4 mm	7.53	11.24	6.19	14.43	5.39	13.69	5.63	15.18
6 mm	9.86	8.32	7.88	14.79	7.06	14.83	7.41	14.86

En la figuras 3.19 a 3.21 se muestran la evolución de los resultados. Como era de esperarse, la abertura de fisura es menor a medida que se incrementa la dosis de fibra en el concreto. Con respecto a la influencia de dirección de la carga, se obtuvieron menores valores cuando se aplicó la carga en la dirección Z, mientras que los valores en las direcciones X y Y son bastante similares.

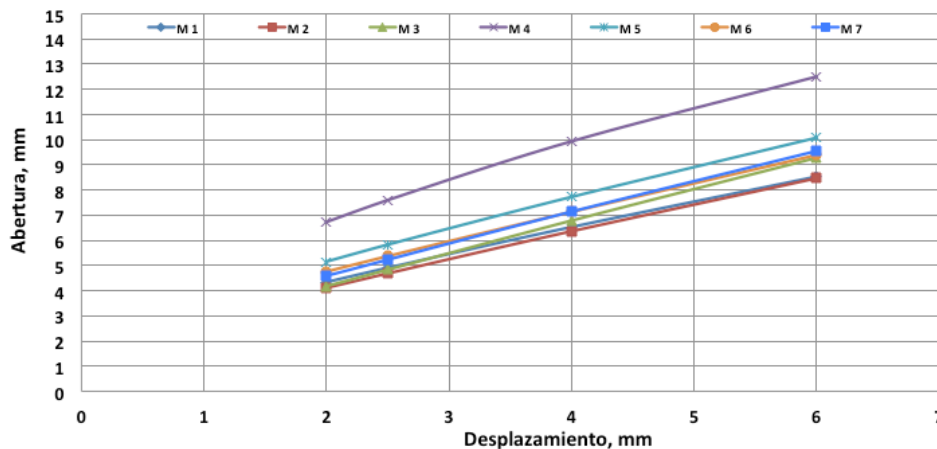


Figura 3.19 Resultados de abertura de fisura del ensayo MDPT- Eje X

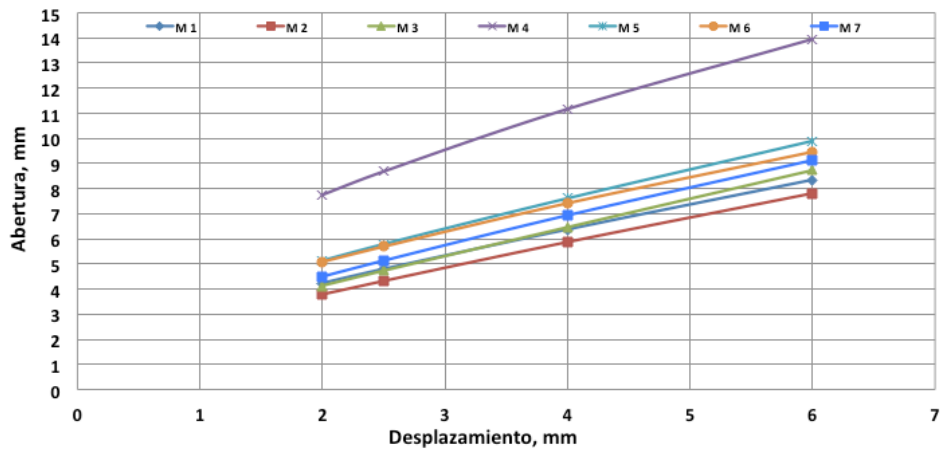


Figura 3.20 Resultados de abertura de fisura del ensayo MDPT- Eje Y

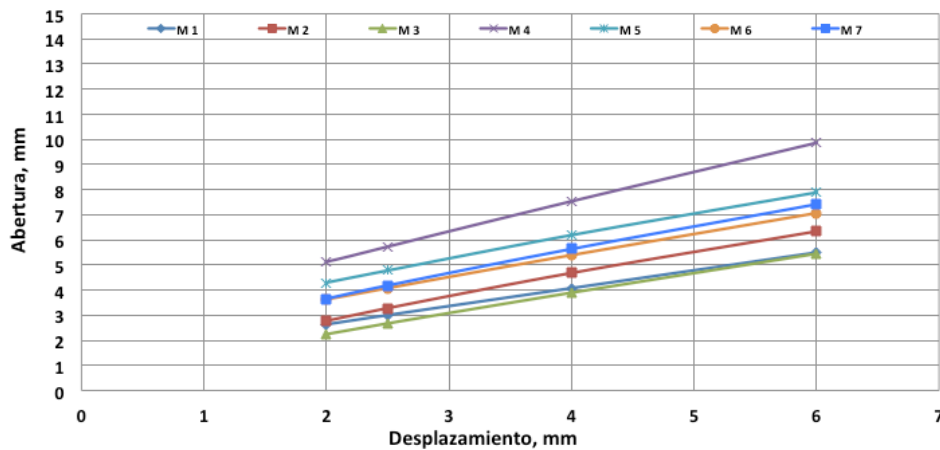


Figura 3.21 Resultados de abertura de fisura del ensayo MDPT- Eje Z

Las diferencias en la influencia de la dirección de la carga están originadas por la orientación de las fibras en el interior de la matriz del concreto. La aplicación de la carga en una dirección u otra hace que las tensiones que se generan se produzcan en diferentes direcciones. Debido a que las fibras están orientadas de manera aleatoria, su contribución es diferente en cada dirección.

Cuando se aplica la carga a través de los punzones, se generan las tensiones radiales desde el centro al borde de la probeta. Como se ha visto en el apartado anterior, la formación de las fisuras principales se produce en el plano en el que un menor número de fibras cosen dicha fisura. Por tanto, la fisura principal se produce en el plano perpendicular al eje con una menor contribución de fibras.

Para el caso en que la carga se aplica en el eje Z, las tensiones se producen en el plano Y-Z y X-Z. En el caso en que la aplicación de la carga se realice ya sea en el eje Y o X, las tensiones se producen en los planos X-Y y X-Z, o bien en Y-X y Y-Z. Las fibras tienden a orientarse preferentemente en un plano horizontal, lo que provoca que la contribución en la dirección vertical sea menor. Es decir que un número inferior de fibras cruzan el plano horizontal dando como resultado una resistencia más reducida. Por esta razón, cuando la carga se aplica en el eje Z, un mayor número de fibras cruzan el plano vertical y da como resultado cargas más elevadas.

## Capítulo 4. Conclusiones

Se evaluaron los resultados dependiendo de la orientación de la carga en probetas cúbicas de concreto reforzado con fibras y su influencia en el comportamiento post-fisuración utilizando el ensayo multidireccional de doble punzonamiento. En este capítulo se presentan las conclusiones.

### 4.1 Resumen de resultados

Los resultados demostraron que el ensayo de caracterización multidireccional, es un procedimiento sencillo y sistemático para determinar las propiedades de post-fisuración del concreto reforzado con fibra. Una de sus principales ventajas es que requiere de una probeta de geometría sencilla y que se puede realizar en una prensa convencional. A diferencia del ensayo DPT, en la cual se emplea una probeta cilíndrica y una instrumentación en base a una cadena circunferencial con extensómetro, el ensayo MDPT tiene la virtud y sencillez de poderse realizar sin instrumentación adicional, ya que el procedimiento se simplifica al realizar el control mediante la medida del desplazamiento del pistón de la prensa de ensayo.

Los resultados obtenidos de los ensayos MDPT en las tres direcciones permiten establecer que existe influencia de la dirección de carga en la respuesta del comportamiento post-fisuración en función de la orientación de las fibras en la matriz del concreto.

La dirección de la aplicación de la carga influye en el tipo de falla del ensayo MDPT. Cuando la dirección de la carga es en el eje Z, se forman tres o cuatro grietas desde el centro de la cara de carga y se extienden radialmente hacia los extremos. En el caso de los ensayos con aplicación de la carga en los ejes Y y X, se presentan dos grietas que dividen la probeta en dos secciones.

Las curvas fuerza versus desplazamiento del pistón presentan un comportamiento similar para todas las series de concreto, independientemente del tipo de fibra empleada y la dirección de la carga. Las curvas presentan tramo inicial lineal ascendente hasta alcanzar la carga máxima. Después aparecen las primeras fisuras y se presenta el régimen del post-fisuración. La carga desciende bruscamente y se mantiene mientras aumenta la abertura de fisura y empiezan a trabajar las fibras.

Los valores de carga máxima obtenidos muestran que la orientación de carga influye en los resultados. En general, los resultados de carga máxima son mayores cuando se aplica la carga en la dirección Z. En promedio, las cargas máximas obtenidas en la dirección Z son mayores en un 10% que las que se obtuvieron en las direcciones Y y X. Además, los valores de carga máxima en las direcciones Y y X son bastante similares. Para las series con fibras de acero la relación de carga máximas Y/X es muy cercano a 1.0, mientras que en las series de fibra sintética fue de 0.98. La variabilidad de los resultados es bastante aceptable. El coeficiente de variación estuvo en el rango de 1.3 a 5.1% para los resultados en el eje X, de 4.8 a 10.2% para los resultados en el eje Y, y de 1.1 a 5.9% para los resultados en la dirección Z.

La carga residual se incrementa a medida que se incrementa la dosis de fibra en el concreto. La dirección de carga influye en los resultados; se obtiene mayores valores cuando se ensayaron en la dirección Z. En las direcciones de ensayo Y y X, los valores de carga residual son bastante similares. Los resultados muestran menor variabilidad cuando se ensayaron en la dirección Z, con valores menores a 15%, mientras que en las direcciones Y y X, se alcanzaron variabilidades elevadas, del orden de 38 y 42%, respectivamente.

Los resultados de tenacidad mostraron la misma tendencia observada en los resultados de carga máxima y carga residual, es decir, su valor aumenta conforme se incrementa la dosis de fibra. También, los valores de tenacidad son mayores para la condición de carga Z. La variabilidad de los resultados en la dirección Z fue en promedio inferior al 10%, y muy superior a este valor los resultados en las direcciones Y y X.

En el caso de la abertura de fisura, ésta es menor a medida que se incrementa la dosis de fibra en el concreto. Se obtuvieron menores valores cuando se aplicó la carga en la dirección Z, mientras que los valores en las direcciones X y Y son bastante similares.

## **4.2 Conclusiones generales**

A continuación se presentan las conclusiones generales:

- El ensayo multidireccional MDPT es un ensayo sencillo, confiable y es una alternativa viable técnica y económicamente para determinar las propiedades de post-fisuración de concreto reforzado con fibras.
- El registro continuo del desplazamiento del pistón y la carga permiten obtener la curva característica que describe el comportamiento del CRF. Por lo tanto, no requiere de instrumentación específica para su ejecución, únicamente necesita una prensa convencional y dos punzones.
- La variabilidad de los resultados obtenidos con el ensayo MDPT es aceptable por la repetibilidad de los resultados.
- La configuración de probeta cúbica permite cuantificar la contribución estructural de las fibras en las direcciones X, Y y Z.
- Las probetas de ensayo son sensibles a la orientación de la aplicación de carga. Los mayores valores de carga residual y tenacidad se obtuvieron cuando la carga se aplicó en la dirección Z. En las direcciones Y y X, los resultados fueron muy similares.
- Las fibras tienden a presentar una orientación preferente en un plano horizontal.

- La contribución de las fibras de acero en el comportamiento post-fisuración del concreto reforzado con fibras es claramente superior que cuando se le incorporan fibras plásticas.
- Una mayor cuantía de fibras mejora la capacidad resistente del material en el régimen post-fisuración. Este efecto se debe a que un mayor número de fibras se encuentran en la sección de la fisura, contribuyendo a coser la fisura y mejorar la resistencia.
- No se aprecian variaciones entre las diferentes dosificaciones en la fase elástica de carga. Se concluye que la incorporación de fibras no influyen durante esta fase.

## Referencias

- ACI Committee 116 (2000), *Cement and Concrete Terminology*. ACI 116R-00. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 73 p
- ACI Committee 211 (1997), *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI 211.1. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 38 p
- ACI Committee 446 (1991), *Fracture mechanics of concrete: Concepts, models and determination of material properties*. ACI 446.1R.91. American Concrete Institute.146 p
- Aenor (2008), *UNE 83.515. Concretos con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Ensayo Barcelona*. Madrid, España, 7pp
- Aire C., Aguado A. y Molins C. (2013), Método de doble punzonamiento de tracción indirecta para concreto reforzado con fibra: Ensayo Barcelona. *Series del Instituto de Ingeniería Investigación y Desarrollo. SID 684. ISBN: 978-607-02-6283-8. DOI: 10.13140/2.1.1804.8808. 20 Noviembre 2013. pp 125*
- Aire C., Molins C. y Aguado A. (2013), *Ensayo de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibra: efecto del tamaño y origen de la probeta*. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo. Vol 5 No.1, p 19-33
- ASTM C31/C31M (1995), *Standard Practice for making and curing concrete test specimens in the field*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C39 (1994), *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C78 (1994), *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third- point loading)*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C138/C138M (1992), *Standard test method for unit weight, yield, and air content (gravimetric) of concrete*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C143/C143M (1990), *Standard test method for slump of hydraulic cement concrete*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C496 (1996), *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C1116/C1116M (2005), *Standard specification for Fiber-Reinforced Concrete*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- ASTM C1550 (2008), *Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel)*. Book of Standards Volume 04.02.
- ASTM C1609 (2010), *Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading)*. Book of Standards Volume 04.02. ASTM
- Blanco A. (2013), *Characterization and modelling of SFRC elements*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Blanco A., Pujadas P., De la Fuente A. y Aguado A. (2010), *Análisis comparativo de los métodos constitutivos del hormigón reforzado con fibras*. Hormigón y Acero, Vol. 61. No. 256, pp 83-101



- Bazant Z. (1985), *Mechanics of fracture and progressive cracking in concrete structures. Fracture Mechanics Applied to Concrete Structures*. Martinus Nijhoff, La Haya, Cap 1
- Barzin M. (2012), *Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites*. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton. 451 pp
- Bernard E. (1999), *Correlations in the performance of fiber reinforced shotcrete beams and panels*. Engineering Report CE9. School of Civil Engineering and Environment. University of Western Sydney. Nepean. Australia
- Bernard E. y Pircher M (2001), *The influence of thickness on performance of fibre reinforced concrete in a round determinate panel test*. Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol 23, No. 1, p 27-33.
- Carmona S., Aguado A., Molins C. y Cabrera M. (2009), *Control de la tenacidad de los concretos reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona)*. Revista Ingeniería de Construcción Vol 24, No. 2 Agosto 2009
- Chen W. (1970), *Double punch test for tensile strength of concrete*. ACI Materials Journal Vol 67 (2), pp 993-995
- EFNARC (1996), *European Specification for Sprayed Concrete*. European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry.
- EN 14651 (2005): *Test method for metallic fibered concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionally (LOP), residual)*. European committee for standardization. Bruselas, Belgica
- Gettu R., Gardner D., Saldivar H. y Barragan B. (2005), *Materials and Structures*, RILEM 38, pp 31-37
- Gopalaratnam V. y Gettu R. (1995), *On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concrete*. International Journal Cement and Concrete Composites. Vol 17, pp 239-254
- Pujadas, P; Blanco, A; Cavalaro, S; de la Fuente, A, y Aguado, A (2013), *New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement*, *Journal of Civil Engineering and Management (JCEM)*, DOI:10.3846/13923730.2012.756425, 19(2), 259-271
- RILEM TC 50-FMC (1985), *Fracture mechanics of concrete. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*. Materials and Structures. V 18. No 106, pp 285-290
- RILEM TC 89-FMT (1990), *Fracture mechanics of concrete. Test methods. Determination of fracture parameters ( $K_{Ic}$  and  $CTOD_c$ ) of plain concrete using three-point bend test*. Materials and Structures. V 23, pp 457-460
- RILEM TC 89-FMT (1990), *Fracture mechanics of concrete. Test methods. Size effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete*. Materials and Structures. V 23, pp 461-465
- Saludes S. (2006), *Ensayo de doble punzonamiento aplicado al concreto reforzado con fibras (ensayo Barcelona)*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona: Ingeniería de la Construcción.
- Saludes S., Aguado A. y Molins C. (2007), *Ensayo de doble punzonamiento aplicado al concreto reforzado con fibras (ensayo Barcelona)*. Cátedra BMB Innovación en Tecnología del Concreto. 1 ed Barcelona. Publicacions del Departament d'Enginyeria de la Construcció. 338p

- Stahli P., Custer R., y Van Mier J. (2008), *On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC*. *Materials and Structures*, 41, pp 189-196
- Serna P., Arango S., Ribeiro T., Nuñez A., y García E. (2009), *Structural cast-in-place FRC: technology, control criteria and recent applications in Spain*. *Materials and Structures* 42 (9), pp 1233-1246 DOI: 10.1617/s11527-009-9540-9
- Tobes J., López A., Giaccio G., y Zerbino R (2008), *Estudio sobre orientación de fibras en hormigones autocompactantes*. 17° Reunión Técnica AATH. Córdoba, Eds. V. Rahhal, pp 103-110
- Torrijos M., Barragan B. y Zerbino R (2010), *Placing conditions mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concrete*. *Construction and Building Materials*, 24 (6), pp 1078-1085. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.11.008
- Vandewalle L., Heirman G., y Van Rickstal F. (2008), *Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete*. 7th International RILEM Symposium on FRC, pp 719-728
- Yardimci M., Baradan B y Tasdemir M., (2008), *Studies on the relation between fiber orientation and flexural performance of SFRSCC*. 7th International RILEM Symposium on FRC, pp 711-718
- Zárate G., (2014) *Análisis del comportamiento a tracción del concreto reforzado con fibras mediante el ensayo de doble punzonamiento*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México.



## POZZOLITH® 322N

Aditivo reductor de agua para concreto

### USOS RECOMENDADOS

- Concreto pretensado y prefabricado
- Concreto reforzado
- Shotcrete vía húmeda
- Concreto ligero y de peso normal
- Concreto bombeado

### DESCRIPCION

POZZOLITH 322N es un aditivo líquido listo para usarse y obtener un concreto más uniforme y de calidad predecible. Cumple con la especificación ASTM C 494 y C494 M para aditivos reductores de agua tipo A, tipo B retardantes, y tipo D aditivos retardantes y reductores de agua.

### CARACTERÍSTICAS

- Reduce el contenido de agua requerido para una manejabilidad determinada

### CARACTERISTICAS DE DESEMPEÑO

#### Datos de la Mezcla - POZZOLITH 322 N

Cemento Tipo I, kg/m <sup>3</sup> (lb/yd <sup>3</sup> )	237 (400)
Asentamiento, mm(in)	125 (5)
Contenido de aire, %	Concreto sin aire incluido
Temperatura concreto	24°C (76°F)
Temperatura ambiente	23°C (74°F)

#### Tiempo de fraguado<sup>(1)</sup>

Mezcla	Fraguado	
	Hr.	Min
Concreto normal	5:20	-
POZZOLITH 322N		
195 ml/100 kg (3 oz fl/100 lb)	5:15	-0:05
325 ml/100 kg (5 oz fl/100 lb)	5:40	+0:20
460 ml/100 kg (7 oz fl/100 lb)	6:20	+1:00

#### Resistencia a Compresión<sup>(1)</sup>

Mezcla	7 días	28 días
Concreto Normal	14.8 MPa (2150 psi), 100 %	21.2 MPa (3070 psi), 100%
POZZOLITH 322N		
195 ml/100 kg (3 oz fl/100 lb)	19.4 MPa (2820 psi) 131%	27.4 MPa (3970 psi) 129 %
325 ml/100 kg (5 oz fl/100 lb)	21.8 MPa (3160 psi) 147 %	28.3 MPa (4100 psi) 134 %
460 ml/100 kg (7 oz fl/100 lb)	22.0 MPa (3190 psi) 148%	30.3 MPa (4390 psi) 143%

(1) Los datos mostrados están basados en pruebas de laboratorio controladas. Se pueden experimentar variaciones razonables de los resultados aquí mostrados como resultado de las diferencias en los materiales de manufactura del concreto y en las condiciones de la obra.

El tiempo de fraguado del concreto está influenciado por la composición física y química de los ingredientes básicos del concreto, la temperatura del concreto y las condiciones climáticas. Las mezclas de prueba deben hacerse con los materiales de la obra para determinar la dosificación requerida para el tiempo de fraguado especificado y un requerimiento de resistencia determinado.

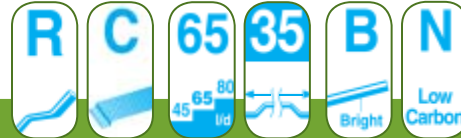
- Características de fraguado normales

### BENEFICIOS

- Mejora la trabajabilidad o manejabilidad del concreto
- Reduce la segregación
- Características de acabado superiores para superficies planas y encofradas
- Aumento de resistencia a la flexión y compresión



# DATA SHEET



## What is Dramix®?

Dramix® steel fibres, from industry specialist Bekaert, have set a new standard for concrete reinforcement with their unique combination of flexibility and cost-efficiency.

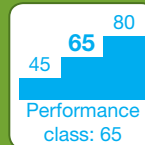
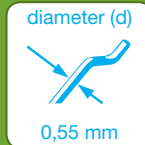
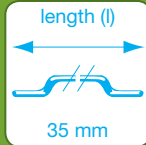
Dramix® is a cold drawn steel wire fibre with hooked ends for optimum anchorage. What you get from Dramix® reinforced concrete is ductility and high load bearing capacity. On top of that, you'll find a quick and easy way to an efficient and cost effective solution.

## RC-65/35-BN offers you:

**✓ Dramix® Easy Mix**  
Dramix® Easy Mix fibres are engineered in such a way to offer fast and perfect mixing, improved pumpability and optimized fibre distribution. Even complex forms and structures are possible.

**✓ Dramix® Hi Perform**  
Dramix® Hi Perform fibres provide high performance and crack resistance. These are products of choice to create optimal ductility. Dramix® Hi Perform is used for structural, designed applications, in situ, precast or sprayed.

### GEOMETRY AND PERFORMANCE



14.500 Fibres/kg    **Minimum dosage:** 15 kg per m<sup>3</sup> (according to CE)  
**Minimum fibre network:** 7,6 km per m<sup>3</sup> (for 15 kg/m<sup>3</sup>)

### MATERIAL PROPERTIES

**Tensile strength:** Rm nom: 1.345 N/mm<sup>2</sup>  
Tolerances: ± 7,5% Avg  
**Young's Modulus (Emod):** ± 210.000 N/mm<sup>2</sup>

### PACKAGING



**60 BAGS (20kg)**  
1200 kg

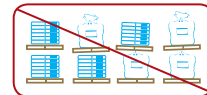


**BIG BAG**  
1100 kg

### STORAGE



**KEEP DRY**



**NO STACKING**

### PRODUCT APPROVALS



**CE**



**ASTM A820**

### SYSTEM APPROVALS



**ISO 9001**



**ISO 14001**

- **CE LABEL:** Dramix® is certified for CE mark system 1: steel fibres for structural use. For detailed info: CE info sheet available on request.
- **ISO 9001:** All Dramix® plants are ISO 9001 certified. The same quality standards are applied.
- **ISO 14001:** Some plants are already ISO 14001 certified. All plants will be ISO 14001 certified before end 2011.

Bekaert will advise on the most suitable fibre for your application.  
- For our recommendations on handling, dosing and mixing.  
- For composition and safe application and in the frame of Reach art.33.  
Please go to: [www.bekaert.com/dosingdramix](http://www.bekaert.com/dosingdramix)  
[infobuilding@bekaert.com](mailto:infobuilding@bekaert.com)

Modifications reserved.  
All details describe our products in general form only. For detailed information, product specifications available on request.



EUCLID CHEMICAL

# TUF-STRAND SF

MACRO SYNTHETIC FIBER

FIBER PRODUCTS

## DESCRIPTION

**TUF-STRAND SF** is a patented polypropylene / polyethylene macro synthetic fiber successfully used to replace steel fibers, welded wire mesh and conventional reinforcing bars in a wide variety of applications. TUF-STRAND SF fibers comply with ASTM C1116, Standard Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete, and are specifically designed to provide equivalent tensile and bending resistance to conventional reinforcement requirements. Concrete reinforced with TUF-STRAND SF will have three-dimensional reinforcing with enhanced flexural toughness, impact and abrasion resistance and will also help mitigate the formation of plastic shrinkage cracking in concrete. Dosage rates will vary depending upon the reinforcing requirements and can range from 3.0 lbs/yd<sup>3</sup> (1.8 kg/m<sup>3</sup>) to 20 lbs/yd (12 kg/m<sup>3</sup>). TUF-STRAND SF synthetic macro-fibers comply with applicable portions of the International Code Council (ICC) Acceptance Criteria AC308 for synthetic fibers, are UL certified for composite metal deck construction and are recognized within ACI 360 and SDI/ANSI-C1.0 as an alternative reinforcement.

## PRIMARY APPLICATIONS

- Slab on Grade and elevated construction (distribution centers, warehouses, etc.)
- Thin walled pre-cast (septic tanks, vaults, walls, etc.)
- Shotcrete for tunnel linings, pool construction and slope stabilization
- Pavements and white-toppings

## FEATURES/BENEFITS

- Equivalent strengths to WWM and rebar provided by engineering calculations
- Controls and mitigates plastic shrinkage cracking and reduces segregation and bleed-water
- Provides three-dimensional reinforcement against micro and macro-cracking
- Reduces equipment wear, fiber rebound and increases build-up thickness compared to steel fibers for shotcrete applications
- Increases overall durability, fatigue resistance and flexural toughness
- Reduction of in-place cost versus wire mesh for temperature / shrinkage crack control
- Easily added to concrete mixture at any time prior to placement
- Tested in accordance with ASTM C 1399, C 1550, C 1609 and C 1018
- Applicable for design by ACI 360 R-10
- Certified for use by UL/ULC for D900 Series metal deck assemblies as alternate to WWF (CBXQ.R13773)

## TECHNICAL INFORMATION

### Typical Engineering Data

Material .....	polypropylene/polyethylene blend	Modulus of Elasticity (EN 14889.2)...	1380 ksi (9.5 GPa)
Specific Gravity .....	0.92	Melt Point .....	320°F (160°C)
Typical dosage rates	3 to 20 lbs/yd <sup>3</sup> (1.8 to 12 kg/m <sup>3</sup> )	Electrical and Thermal Conductivity.....	low
Available lengths.....	2" (51 mm)	Water Absorption .....	negligible
Aspect Ratio.....	74	Acid and Alkali Resistance .....	excellent
Tensile Strength .....	87-94 ksi (600 to 650 MPa)	Color .....	white

## PACKAGING

TUF-STRAND SF fibers are packaged in 3.0 lb (1.36 kg), 4.0 lb (1.81 kg) and 5.0 lb (2.27 kg) water soluble bags.

## SHELF LIFE

3 years in original, unopened package.

TUF-STRAND SF

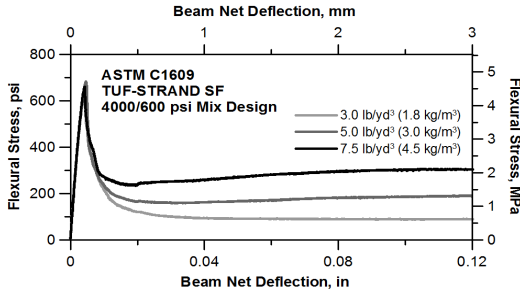
MASTER FORMAT #:  
03 24 00

## DIRECTIONS FOR USE

TUF-STRAND SF fibers can be added to the concrete mixture at any time prior to placement of the concrete. It is generally recommended to add any fiber material at the ready-mix concrete plant during batching. Fibers must be mixed with concrete for a minimum of three (3) to five (5) minutes at maximum mixing speed, depending on the mixer type, to ensure complete dispersion and uniformity. When adding 3 to 5 lbs/yd<sup>3</sup> (1.8 to 3 kg/m<sup>3</sup>), a slump loss of up to 2" (50 mm) can be expected for a typical ready-mix concrete design. For dosages of 6 to 12 lbs/yd<sup>3</sup> (4 to 7 kg/m<sup>3</sup>), a slump loss of 3 to 5 in (75 to 125 mm) can be expected. The use of water reducers and/or superplasticizers, such as Eucon 1037, Eucon MRX or the Plastol series of admixtures may be necessary to maintain desired workability.

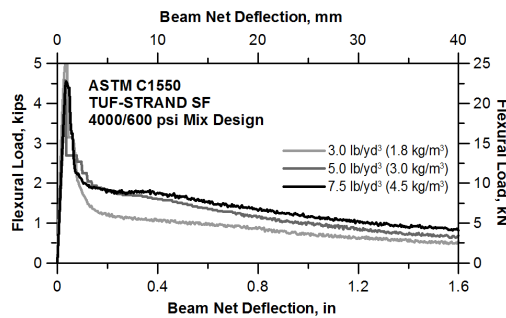
Add other admixtures independently from fiber addition. TUF-STRAND SF is compatible with all Euclid Chemical admixtures. When used properly, and placed in a concrete mix of sufficient workability, the fibers will not adversely alter the compressive or flexural strength of concrete or shotcrete.

Fiber-reinforced concrete (FRC) is characterized by standard test methods such as ASTM C1399, C1609, and C1550 or RILEM TC162 (EN14651). The flexural residual strength of FRC is measured using these beam tests and is used for design purposes with proper conversion factors. Typical test results for ASTM C1609 (FRC beam) and C1550 (FRC round panel) are shown for TUF-STRAND SF macro synthetic fiber tested at different dosage rates. These test results could vary with mix design and curing conditions.



Dosage	$f_{es}$	$R_{es}$
lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	psi (MPa)	%
3.0 (1.8)	128 (0.9)	22±3
5.0 (3.0)	203 (1.4)	30±2
7.5 (4.5)	288 (2.0)	44±4

(Typical Data)



Dosage	Energy (J) at Deflection (mm)				
lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	5	10	20	30	40
3.0 (1.8)	43	67	109	144	171
5.0 (3.0)	48	83	138	178	208
7.5 (4.5)	58	107	190	254	302

(Typical Data)

## CLEAN-UP

Loose fiber material may be disposed in proper receptacles for refuse. Finishing equipment with fibers embedded in concrete should be thoroughly cleaned.

## PRECAUTIONS/LIMITATIONS

- Use of fibers may cause an apparent loss in measured slump of concrete. This may be offset with the use of a water reducing admixture if necessary.
- Fibers should never be added to a "zero-slump" concrete. Ensure a minimum concrete slump of 3" (80 mm) prior to addition of any fiber material. Fibers may also be added in loose form to aggregate charging devices.
- In all cases, consult the Material Safety Data Sheet before use.

Rev. 11.14

**WARRANTY:** The Euclid Chemical Company ("Euclid") solely and expressly warrants that its products shall be free from defects in materials and workmanship for one (1) year from the date of purchase. Unless authorized in writing by an officer of Euclid, no other representations or statements made by Euclid or its representatives, in writing or orally, shall alter this warranty. EUCLID MAKES NO WARRANTIES, IMPLIED OR OTHERWISE, AS TO THE MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR ORDINARY OR PARTICULAR PURPOSES OF ITS PRODUCTS AND EXCLUDES THE SAME. If any Euclid product fails to conform with this warranty, Euclid will replace the product at no cost to Buyer. Replacement of any product shall be the sole and exclusive remedy available and buyer shall have no claim for incidental or consequential damages. Any warranty claim must be made within one (1) year from the date of the claimed breach. Euclid does not authorize anyone on its behalf to make any written or oral statements which in any way alter Euclid's installation information or instructions in its product literature or on its packaging labels. Any installation of Euclid products which fails to conform with such installation information or instructions shall void this warranty. Product demonstrations, if any, are done for illustrative purposes only and do not constitute a warranty or warranty alteration of any kind. Buyer shall be solely responsible for determining the suitability of Euclid's products for the Buyer's intended purposes.