

## Experimental mechanical characterization of steel and polypropylene fiber reinforced concrete

**Alejandro Meza de Luna<sup>1,2</sup>, José Ángel Ortiz Lozano<sup>1\*</sup>,  
Lorenzo Peralta Jaime<sup>3</sup>, Jesús Pacheco Martínez<sup>1</sup>, Juan José Soto Bernal<sup>2</sup>,  
Sabás H. Rangel Martínez<sup>1</sup>, Raudel Padilla Ceniceros<sup>1</sup>,  
Jesús Alvarado Flores<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Construcción y Estructuras, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad 940 (edificio 108), Ciudad Universitaria, C.P. 20131. Tel. +52(449)9107400.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Av. Adolfo López Mateos 1801 Ote. Fracc. Bona Gens, C.P. 20256. Tel. +52(449)9105002.

<sup>3</sup>Grupo Constructor PEASA, S.A. de C.V. Filemón Alonso 112, Cd. Industrial, C.P. 20290. Tel. +52(449) 9711131.

Aguascalientes, Ags., México. \*aortiz@correo.uaa.mx

### Abstract

This paper presents the results about the mechanical characterization of steel and polypropylene fiber reinforced concrete to be used in industrial ground floor slabs, assessing parameters such as compressive strength, modulus of elasticity, compressive toughness, flexural strength, flexural toughness, flexural residual strength and fracture energy. The characterization plan consisted in manufacturing cylindrical and prismatic specimens of fiber reinforced concrete, including nine types of fibers: five of steel and four synthetic or polypropylene. Also, non-reinforced concrete samples were mixed as a reference, based on a design of 40 MPa flexural strength concrete used for industrial ground floor slabs. Based on the results, it was observed that the shape and length of fibers have influence over flexural strength development and over some other concrete mechanical properties as ductility, since concrete samples made with steel fibers with hooks in its extremes showed a better adherence to concrete, while straight copolymer fiber and wavy polymer fiber showed a better general performance. Finally, it was observed a good correlation between compression toughness values and flexural ones.

**Keywords:** fiber reinforced concrete, steel fibers, synthetic fibers, industrial ground floor slabs, mechanical properties.

## Estudio experimental de caracterización mecánica del concreto reforzado con fibras de acero y de polipropileno

### Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental de caracterización de concretos reforzados con fibras de acero y polipropileno para ser utilizados en pisos industriales, evaluando parámetros como resistencia a compresión, módulo de elasticidad, tenacidad a compresión, resistencia a flexión, tenacidad a flexión, resistencia residual a flexión y energía de fractura. El programa de ensayos de caracterización consistió en la elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas de concreto reforzado con fibras incluyendo nueve tipos de fibras: cinco de acero y cuatro sintéticas o de polipropileno. Asimismo se

fabricaron probetas de concreto sin ningún tipo de refuerzo como parámetro de referencia, tomando como base un concreto utilizado para pisos industriales de 40 MPa de resistencia a flexión. De los resultados se observó que la forma y longitud de las fibras tienen influencia en el desarrollo de resistencia a flexión y otras propiedades mecánicas como la ductilidad, ya que la fibra de acero con extremos con ganchos mostró una mejor adherencia con el concreto, mientras que la fibra de copolímero tipo recta y polímeros tipo ondulada generaron un mejor desempeño en el concreto. Finalmente se observó una concordancia entre los valores obtenidos de tenacidad a compresión y a flexión.

**Palabras clave:** concreto reforzado con fibras, fibras de acero, fibras sintéticas, pisos industriales, propiedades mecánicas.

## Introducción

En las últimas décadas, el uso de concreto reforzado con fibras se ha incrementado en aplicaciones muy diversas, entre ellas los pisos industriales. Las fibras metálicas y poliméricas son usadas para reforzar el concreto e incrementar su tenacidad y el control de la fisuración. El concreto reforzado con fibras (*fiber reinforced concrete*, FRC) puede ser utilizado sustituyendo o incluso eliminando el refuerzo convencional, así como también reducir el grosor de una losa industrial; existen numerosas formulaciones propuestas para cuantificar el incremento en las resistencias mecánicas a flexión con el uso de fibras en el concreto [1-4].

Usualmente, el índice de tenacidad después de la primera fisura ha sido ignorado en el diseño de pisos industriales de concreto convencional, sin embargo en el caso de concretos reforzados con fibras se debe considerar la resistencia post pico como lo demuestran otros estudios [5], por lo que sus fórmulas emplean un índice diferente obtenido a partir de distintos ensayos y sobre diferentes tipos de probetas.

Este artículo presenta los resultados experimentales de un proyecto de investigación sobre concreto reforzado con distintos tipos de fibras de acero y polipropileno, con el fin de optimizar el diseño de pisos industriales para la industria metal-mecánica y aeronáutica, con el uso de fibras como único refuerzo. Adicionalmente se está trabajando en otros estudios enfocados a la interacción suelo-piso industrial reforzado con fibras, así como a la resistencia al desgaste por abrasión de superficies de pisos industriales, modificadas con diferentes tipos de endurecedores químicos.

## Parte experimental

### Tipos de fibras empleadas

Se utilizaron dos tipos de fibras en relación al material de fabricación: fibras de acero (SFRC) y fibras sintéticas (polipropileno y copolímero; PFRC), las dosificaciones se eligieron en base a las recomendaciones dadas por los fabricantes, con el criterio de cuantías mínimas para lograr efectos apreciables en cuanto a tenacidad en el concreto. En la Tabla 1 se muestran algunas de las características físicas y mecánicas de las nueve fibras empleadas en el presente estudio.

### Materiales utilizados para la fabricación de concreto

Se utilizó cemento Portland Tipo I ASTM con una resistencia a la flexión de 40 MPa a los 28 días, además de cuatro tipos diferentes de agregados en la Figura 1, se muestra la distribución granulométrica de los agregados y del esqueleto granular del concreto utilizado.

El mezclado del concreto se realizó en una revolvedora de laboratorio con capacidad de 255 litros y con una velocidad angular de trabajo de 28 a 32 RPM. La temperatura ambiental a la cual fueron elaboradas las mezclas de concreto se mantuvo entre 20 y 25°C. Para todas las mezclas con y sin fibras la relación de agua cemento (w/c) fue de 0,6. Se utilizó un aditivo polifuncional reductor de agua y retardante de fraguado en base a sulfonatos surfactantes. Las proporciones de los constituyentes utilizadas para la elaboración del concreto (sin considerar las fibras) se muestran en la Tabla 2. El esqueleto granular se mantuvo constante para que no fuese un parámetro de variabilidad en el comportamiento del concreto y que los resultados obtenidos reflejen solamente el

Tabla 1. Características físicas y mecánicas de las fibras estudiadas

Fibra	Marca	Material	Forma	Resistencia a la tensión (MPa)	Longitud (mm)	Sección (mm)	Relación de Fibras aspecto L/D por kg	Módulo de Young (MPa)	Dosificación (kg/m <sup>3</sup> )
SFRC1	Dramix®	Acero	Con ganchos	1160	60	Cilíndrica 0.9	66.66	210000	28
SFRC2	Ramgra® con estribos	Acero	Con ganchos	1072	40	Cilíndrica 1	40	210000	28
SFRC3	Ramgra® ondulada	Acero	Dentada	1072	29	Cilíndrica 1	29	210000	28
SFRC4	Fibracero®	Acero	Dentada	1100	25	Cilíndrica 0.5	24.44	210000	27
SFRC5	Tecnor®	Acero	Ondulada	1765	39	Rectangular 2×1	50	27500	6
PFRC1	Macmatrix®	Polipropileno	Recta	586	50	Rectangular 1.5×0.5	61.15	44950	3
PFRC2	Masterfiber® micro	Polipropileno	Recta	552	19	Cilíndrica 0.01	1900	90e6	0.6
PFRC3	Masterfiber® STR	Copolímero	Recta	637	38	Rectangular 2×0.5	33.67	75758	2.7
PFRC4	Tufstrandsfeucld®	Polipropileno	Ondulada	625	50	Cilíndrica 0.66	75.75	61350	3

efecto de las fibras. Asimismo, debido a que las cuantías de fibra en el concreto son relativamente bajas, la variación en las proporciones de agregados prácticamente son insignificantes.

Los moldes utilizados para los especímenes cumplen con la norma ASTM C-192, con dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para las probetas tipo cilíndricas y de 15 cm de ancho, 15 cm de altura y 50 cm de largo para las probetas prismáticas. Una vez fabricados las probetas, éstas fueron cubiertas con plástico para controlar la pérdida de humedad durante las primeras 24 horas, posteriormente se desmoldaron y fueron sumergidos en piletas de agua cuya temperatura fue constante de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , hasta la fecha de los ensayos de caracterización mecánica a 3, 7 y 28 días de acuerdo a la norma ASTM C-511. En total se elaboraron 120 probetas cilíndricas, de las cuales se ensayaron 3 probetas a 3 días, 3 probetas a 7 días y 6 probetas a 28 días, así como 60 probetas prismáticas de las cuales se ensayaron 6 probetas a 28 días, tanto para el concreto sin fibras como para todos los concretos reforzados con los nueve tipos distintos de fibras (Tabla 1).

## Resultados

### Resistencia a compresión, módulo de elasticidad e índices de tenacidad a compresión

Se caracterizó la resistencia a la compresión simple a 3, 7 y 28 días y el módulo de elasticidad del concreto a 28 días, de acuerdo a las normas ASTM C-39 y C-469, respectivamente. En la Tabla 3 se muestran los resultados, así como su coeficiente de variación porcentual entre paréntesis.

Se observa en los resultados de resistencia a compresión, que existen fibras que provocan una reducción en la resistencia a la compresión la cual es más notoria a 3 días y con forme aumenta el tiempo de curado tiende a reducirse e incluso en algunos casos superar la resistencia del concreto sin fibras (NF). Esto se debe principalmente al efecto en el incremento de la porosidad que causa la adición de fibras al concreto, estos resultados se relacionan con otra investigaciones [6]. Asimismo, se ha reportado que el efecto de la adición de fibras de acero en la resistencia a compresión es insignificante para cuantías de hasta el 25% [7],

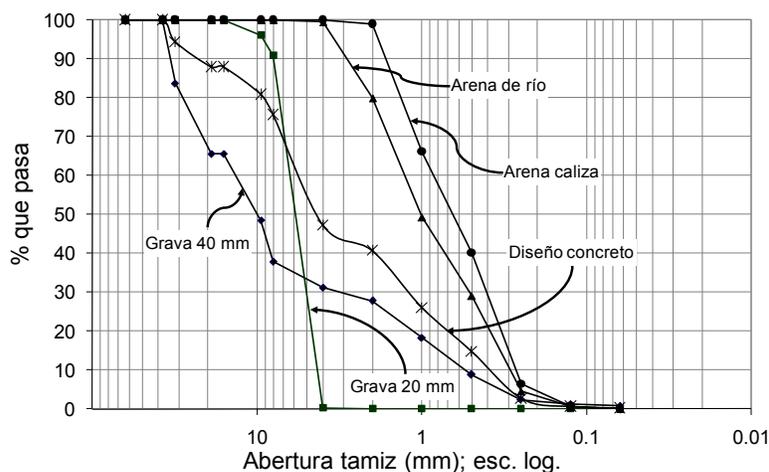


Figura 1. Distribución granulométrica de los agregados empleados y del esqueleto granular del concreto.

 Tabla 2  
 Proporciones del concreto MR-40 (sin considerar las fibras)

Componentes de la mezcla	Cantidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad	Absorción (%)
Cemento	308,00	3,15	NA
Arena triturada caliza	189,00	2,63	4,8
Arena de río	484,44	2,40	4,2
Grava triturada riolítica de 20mm	531,32	2,59	1,01
Grava triturada riolítica de 40mm	648,00	2,62	2,04
Agua	185,00	1,00	NA
Aditivo líquido	2,06	1,20	NA
Fibra de acero o polipropileno	variable (Tabla 1)	variable (Tabla 1)	NA

 Tabla 3  
 Resultados de resistencia a compresión y módulo de elasticidad

Fibra	f'c (Mpa)			E (MPa)
	3 días	7 días	28 días	28 días
NF	24,33 (3,17)	26,96 (2,44)	30,62 (5,39)	48066 (6,05)
SFRC 1	22,86 (3,52)	27,11 (2,76)	33,09 (4,86)	47579 (5,26)
SFRC 2	24,20 (3,74)	28,30 (1,81)	32,98 (3,62)	45493 (1,13)
SFRC 3	20,83 (8,25)	24,18 (9,19)	27,36 (6,41)	48867 (4,12)
SFRC 4	22,89 (3,65)	27,42 (0,85)	32,44 (1,59)	46463 (4,12)
SFRC 5	2,68 (3,23)	24,53 (7,90)	30,48 (8,28)	49194 (3,91)
PFRC 1	20,38 (4,87)	26,94 (5,70)	30,50 (4,16)	48658 (5,43)
PFRC 2	23,42 (7,06)	27,37 (5,90)	31,72 (3,76)	47124 (2,91)
PFRC 3	23,21 (4,18)	28,97 (3,01)	32,64 (3,44)	46824 (2,70)
PFRC 4	22,62 (3,32)	26,01 (3,71)	31,35 (4,86)	48308 (4,28)

lo cual se manifiesta en este estudio, ya que no existe variación significativa de los resultados de resistencia a compresión entre los concretos reforzados con fibras y los que no contienen fibras, básicamente debido al hecho de que en compresión el concreto proporciona toda la resistencia mecánica y las fibras solamente aportan resistencia en el régimen post-fisuración [6]. De igual forma, los resultados obtenidos en relación al módulo de elasticidad del concreto, tanto con fibras como sin éstas, muestran que la adición de fibras al concreto no genera una variación notable en la rigidez del concreto a compresión. Asimismo, se determinaron los índices de tenacidad a compresión mediante la obtención del área bajo la curva esfuerzo-deformación unitaria en compresión,

utilizando el instrumental descrito en la norma ASTM C-469; los diagramas de esfuerzo contra deformación unitaria longitudinal y transversal a compresión a los 28 días se muestran en la Figura 2.

La Tabla 4 presenta los resultados correspondientes a los índices de tenacidad a compresión del concreto simple y del concreto reforzado con fibras hasta una deformación unitaria de 0,005.

En base a los resultados de tenacidad a compresión obtenidos, puede verse que el concreto reforzado SFRC 1 tuvo un mejor comportamiento en su índice de tenacidad a compresión. Asimismo, se observa que existen concretos reforzados

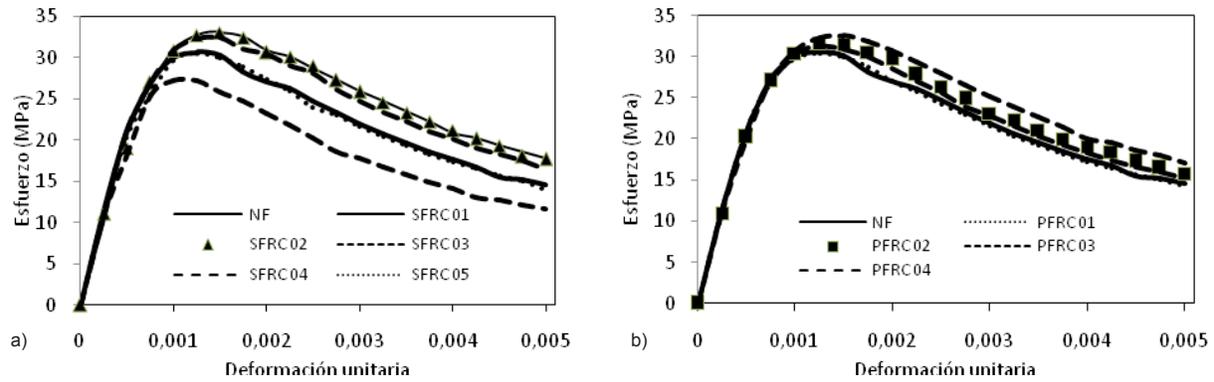


Figura 2. a) Gráfica esfuerzo-deformación unitaria a compresión para el concreto SFRC  
 b) Gráfica esfuerzo-deformación unitaria a compresión para el concreto PFRC.

Tabla 4  
 Índices de tenacidad a compresión hasta una deformación unitaria de 0,005

Fibra	Índice de tenacidad (kPa)			
	Hasta el esfuerzo máximo (deformación unitaria)	Hasta 0.003	Hasta 0.004	Hasta 0.005
NF	33,72 (0,00125)	78,29	96,29	112,21
SFRC 1	42,84 (0,00150)	85,90	108,25	126,80
SFRC 2	42,73 (0,00150)	85,60	107,84	126,30
SFRC 3	24,59 (0,00100)	68,32	83,28	95,44
SFRC 4	42,60 (0,00150)	83,86	105,01	122,48
SFRC 5	33,72 (0,00125)	77,77	96,11	111,14
PFRC 1	33,79 (0,00125)	77,76	96,05	111,03
PFRC 2	34,31 (0,00125)	81,67	101,78	118,35
PFRC 3	42,63 (0,00150)	84,53	106,11	123,98
PFRC 4	34,28 (0,00125)	80,41	99,81	115,76

con fibras que la tenacidad a compresión en general es menor que la correspondiente al concreto sin fibras. También se muestra que los concretos reforzados con fibras sintéticas tienden a generar una uniformidad en su comportamiento de resistencia a compresión. En base a los resultados de los ensayos se puede inferir que las fibras actuarán después de que ocurra la fisura en el concreto, lo cual concuerda con otros resultados [6, 8].

**Módulo de ruptura, índices de tenacidad y resistencia residual a flexión en vigas prismáticas**

Se caracterizó experimentalmente la resistencia a flexión mediante la obtención del módulo de ruptura del concreto a los 28 días de edad, mediante el ensayo a flexión con cuatro puntos, como lo establece la norma ASTM C78. En la Figura 3 se muestran las curvas carga-deflexión vertical, en las cuales se puede observar un aumento en la ductilidad, provocadas por la acción de las fibras; cabe mencionar que los concretos fabricados con las fibras SFRC 3 y PFRC 2 no aportaron al concreto ninguna ductilidad asociada debido básicamente a la nula adherencia entre la fibra y la matriz cementante (lo cual se observó físicamente en las probetas), motivo por el cual se excluyeron de estas gráficas.

Puede verse en la Figura 3 que en las vigas de concreto SFRC, las cargas máximas llegan a ser de hasta un 17% mayor con respecto a la viga de referencia sin fibras (NF). Por el contrario, en las vigas de concreto PFRC, solo una de ellas (PFRC 1) llega a superar en 1% la carga máxima, lo cual sugiere que la aportación de resistencia

mecánica a flexión de las fibras de acero es mayor que las de polipropileno. Por el contrario, se observa asimismo un incremento de tenacidad de las vigas de concreto reforzado con fibras respecto a las que no contienen fibras, lo que conlleva al hecho ya bien conocido de que la adición de fibras induce una notable mejora en cuanto a las propiedades de ductilidad del concreto [5, 7-9]. Aunque en general las fibras de polipropileno no presentan ventajas en la carga máxima, la ductilidad de estas vigas se puede comparar con la presentada por las que contienen fibras de acero. Asimismo, se determinaron los índices de tenacidad a flexión mediante la obtención del área bajo la curva carga-deflexión vertical en flexión (energía absorbida por las vigas prismáticas de concreto), siguiendo las recomendaciones de la norma JCI-SF4, del *Japanese Concrete Institute* y los criterios de las normas ASTM C-1018 y C-1399[5,9]. La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos.

Las vigas de concreto reforzado con las fibras SFRC 3 y PFRC 2 en las dosificaciones marcadas en la Tabla 1 no presentaron ninguna ductilidad después de la primera fisura debido básicamente a la nula adherencia observada físicamente entre las fibras y la matriz cementante, mostrando un comportamiento muy similar al concreto sin fibras, por lo que los parámetros que miden el comportamiento de tenacidad ( $R_{e,3}$ ,  $R_{5-10}$  y  $R_{10-20}$ ) son nulos (NA). En este sentido, dicho comportamiento está en concordancia con otros trabajos experimentales [5, 9], en los cuales se ha denotado que los concretos reforzados con fibras de acero de forma dentada (SFRC3) por lo general presentan una menor tenacidad en relación a fibras con otras geometrías. Asimismo, otro pará-

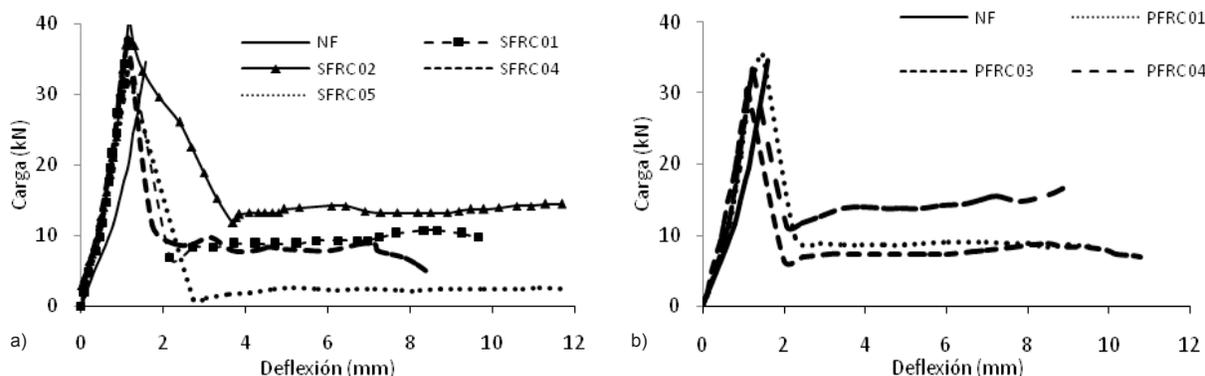


Figura 3. a) Gráfica carga-deflexión para concretos reforzados con fibras de acero a 28 días  
 b) Gráfica carga-deflexión para concretos reforzados con fibras sintéticas a 28 días.

Tabla 5  
Módulo de ruptura, índices de tenacidad y resistencia residual a flexión en vigas prismáticas a 28 días

Fibra	MR (MPa)	$f_{e,3}$ (MPa)	$R_{e,3}$ (%)	$I_5$	$I_{10}$	$I_{20}$	$R_{5-10}$	$R_{10-20}$
NF	4,362	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SFRC 1	4,869	2,86	58,77	4,36	7,05	11,20	57,00	41,50
SFRC 2	4,856	2,43	50,01	3,53	5,58	10,60	41,00	46,33
SFRC 3	4,194	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SFRC 4	4,488	2,12	47,28	3,40	5,00	6,77	32,00	17,67
SFRC 5	4,475	2,24	50,10	3,50	4,43	4,98	18,50	5,50
PFRC 1	4,345	2,28	52,52	3,30	4,75	7,40	29,00	26,50
PFRC 2	4,213	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PFRC 3	4,643	1,79	38,56	2,78	3,93	6,35	23,00	24,17
PFRC 4	4,536	2,26	49,00	3,08	4,98	9,63	38,00	46,50

metro que influye en el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras es la longitud de la fibra y, de esta forma, la longitud de anclaje de la fibra dentro del concreto; en este caso la fibra SFRC3 es relativamente corta (25 mm) en relación con otras fibras [10, 11] y lo cual pudiera explicar la poca adherencia y el arrancamiento súbito de la matriz cementante. Puede apreciarse que la aportación de las fibras a la tenacidad, medida en función del valor de resistencia residual  $R_{e,3}$ , se encuentra entre el 38 y el 59% en general, lo que concuerda con otros estudios que han reportado que el concreto reforzado con fibras a bajas cuantías (por debajo del 0.5%), presentan valores de resistencia residual  $R_{e,3}$  entre el 20 y el 50% [7].

### Energía de fractura ( $G_f$ )

La energía de fractura se define como la energía requerida para propagar una grieta por unidad de área; esta energía dependerá directamente de las características del material, por ejemplo en el caso de un ensayo tipo viga esta energía estará en función de la relación agudamiento, el tamaño máximo de los agregados, la edad del concreto, etc. La energía de fractura se puede obtener por ensayos de tensión en forma indirecta, pero lo más común es obtener su valor mediante ensayos a flexión con vigas con entalla en función del CMOD [12, 13]. Para relacionar la energía de fractura en función de un ensayo de flexión se utiliza la relación empleada por Yining [12] y Hillerborg [14].

Debido a que la caracterización del concreto a flexión fue mediante vigas sin entalla, se correlacionó la deflexión vertical con la abertura de la fisura o CMOD (*crack mouth opening displacement*), para todas las probetas prismáticas analizadas en este estudio mediante dos métodos, uno analítico basado en la deflexión y la geometría de la viga [15] y otro empírico basado en estudios experimentales de correlación entre medición de deflexión y de CMOD directamente [12]; se observó que los resultados obtenidos tienen una variación insignificante, menor al 3%, por lo que se demuestra una congruencia muy apropiada entre ambos métodos. En ambos estudios referidos anteriormente se midieron las deflexiones verticales en probetas sin entalla y el CMOD en probetas con entalla. Se utilizó la ecuación 1 para determinar la energía de fractura de las vigas de concreto reforzado con fibras a 28 días; la Tabla 6 muestra los resultados.

$$G_f = \frac{A_1 + 2\left(\frac{Mgl}{4\theta}\right)\xi}{(b)(d)} \quad (1)$$

donde:

$A_1$  = área bajo la curva del diagrama carga-deformación hasta la deformación de cálculo (N-m)

M = peso de la viga (kg)

g = gravedad = 9.81 m/s<sup>2</sup>

l = longitud de la viga (m)

Tabla 6  
Energía de fractura contra deformación para concreto reforzado con fibras de acero y polipropileno, a 28 días

Fibra	Energía de fractura (N/m)				
	Hasta la carga máxima (deformación en mm)	Deflexión en mm			
		Hasta 3.7	Hasta 5.7	Hasta 7.3	Hasta 8.4
NF	1001 (1,59)	NA	NA	NA	NA
SFRC 1	1942 (1,14)	2702	3486	4070	4533
SFRC 2	4001 (1,18)	4038	5639	6385	7080
SFRC 3	949 (1,58)	NA	NA	NA	NA
SFRC 4	1659 (1,15)	2637	3283	3700	4044
SFRC 5	2127 (1,14)	2208	2419	2568	2656
PFRC 1	1904(1,48)	2743	3399	4114	4476
PFRC 2	1023 (1,60)	NA	NA	NA	NA
PFRC 3	1449 (1,1)	2096	2701	3423	3743
PFRC 4	1548 (1,23)	2906	4117	5032	5769

$\delta$  = deformación hasta la ruptura (m)

$b$  = espesor de la viga (m)

$d$  = ancho de la viga (m)

$e$  = distancia del apoyo hasta la aplicación de la carga (m)

Puede verse en los resultados que la fibra de acero que generó valores más altos en energía de fractura es la SFRC 2, mientras que la fibra PFRC 4 resultó con la energía de fractura mayor en el ramo de fibras de polipropileno. En este caso estos valores no concuerdan con el factor de resistencia residual ( $R_{e,3}$ ) calculado bajo el criterio dado en la normativa JCI-SF4, más sin embargo sí tienen correlación en cuanto a comportamiento de tenacidad con el factor de resistencia residual  $R_{10-20}$  calculado mediante los criterios de las normativas ASTM C-1018 y C-1399, presentados en la Tabla 5.

## Discusión de resultados

### Relación entre resistencia a compresión axial y resistencia a flexión

En la Figura 4 se muestra la relación entre la resistencia a compresión axial y la resistencia a

flexión para probetas de concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) y sintéticas (PFRC), respectivamente, a 28 días de edad, en la cual se puede apreciar una mayor dispersión de resultados en el concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) en comparación con los resultados del concreto reforzado con fibras sintéticas (PFRC); lo cual coincide con otros estudios realizados [8]. Esta variabilidad puede estar asociada con la dosificación, características de las fibras y con el grado de adherencia de las fibras con la matriz de concreto.

En función de la figura anterior, es posible relacionar el comportamiento de la resistencia a compresión ( $f'c$ ) y la correspondiente resistencia a flexión (MR), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$MR = k\sqrt{f'c} \quad (2)$$

donde:

MR= resistencia a flexión (MPa)

$k$ = factor de correlación (adimensional)

$f'c$ = resistencia a compresión (MPa)

La Tabla 7 muestra los resultados del factor de correlación ( $k$ ) correspondiente; estos parámetros fueron comparados entre probetas cilíndricas y prismáticas con el concreto SFRC y PFRC de

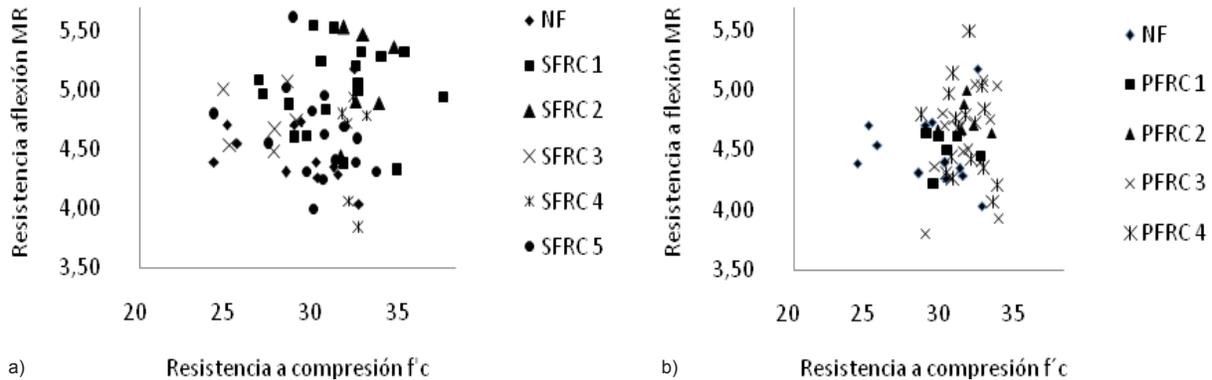


Figura 4. a) Relación entre resistencia a compresión axial y a flexión para el concreto SFRC, a 28 días  
b) Relación entre resistencia a compresión axial y a flexión para el concreto PFRC, a 28 días.

Tabla 7  
Valores de la constante de relación (k) entre  $f'c$  y MR

Fibra	NF	SFRC1	SFRC2	SFRC3	SFRC4	SFRC5	PFRC1	PFRC2	PFRC3	PFRC4
k	0,83	0,88	0,88	0,9	0,78	0,81	0,82	0,85	0,81	0,84

la misma manufactura y día, con el fin de poder establecer una comparación válida.

## Conclusiones

De los resultados de caracterización a compresión se encontró que la adición de fibras no implica un incremento significativo de resistencia mecánica y de rigidez (módulo de elasticidad) entre un concreto con y sin fibras; esta conclusión es paralela a otros estudios realizados previamente. Se observa una concordancia en los valores obtenidos de ductilidad a compresión y a flexión, teniendo que las fibras que mejor desempeño tuvieron fueron las SFRC 1 y PFRC 4, ya que mostraron los mayores valores de tenacidad a compresión y a flexión. De los resultados de caracterización a flexión se encontraron las siguientes tendencias en cuanto a tenacidad: los concretos reforzados con fibras de acero con ganchos en sus extremos mostraron el mejor comportamiento pre-fisura y post-fisura, le siguen en soporte los hechos con fibras de acero onduladas y por último las fibras de acero dentadas. En el caso de las fibras de polipropileno, éstas tienen un comportamiento similar en el régimen pre-fisura, pero en el régimen post-fisura el mejor desempeño lo obtuvo el concreto reforzado con la fibra ondulada en comparación con el reforzado con la fibra recta. Las tendencias de los resultados obtenidos en cuanto a energía de frac-

tura no concuerdan con el factor de resistencia residual ( $R_{e,3}$ ) calculado bajo el criterio dado en la normativa JCI-SF4, más sin embargo sí tienen correlación en cuanto a comportamiento de tenacidad con el factor de resistencia residual  $R_{10-20}$  calculado mediante los criterios de las normativas ASTM C-1018 y C-1399. La forma y longitud de las fibras (p.ej. la relación de aspecto), tanto de acero como sintéticas, tienen influencia en el desarrollo de resistencia a flexión y otras propiedades mecánicas como la ductilidad, ya que la fibra de acero con extremos con ganchos mostró una mejor adherencia con el concreto, mientras que la fibra de copolimero tipo recta y polímeros tipo ondulada generaron un mejor desempeño en el concreto. Algunas fibras mostraron un comportamiento a flexión muy desfavorable, como la fibra SFRC3, en cuyas vigas se obtuvo una fractura súbita y no se generó ninguna resistencia residual. En forma general se aprecia que los valores de los esfuerzos residuales son bajos, esto se debe a que las cuantías de refuerzo con fibras son relativamente bajas también; actualmente se está trabajando en distintas proporciones de fibra mayores a las presentadas en este artículo.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Grupo Constructor PEASA y al Consejo

Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por el financiamiento de este proyecto de investigación a través del Convenio de Colaboración C. No. E. 94/11 en el marco del proyecto clave ECO-2011-COI-171093, del Fondo de Innovación Tecnológica Secretaría de Economía-CONACYT.

### Referencias bibliográficas

1. Blanco A.: "Tesis de grado durabilidad del hormigón con fibras de acero", Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2008.
2. Blanco A., Pujadas P, de la Fuente A., Cavalero S., Aguado A.: "Application of constitutive models in European codes to RC-FRC", *Construction and Building Materials*, Vol. 40 (2013) 246-259.
3. Pujadas P: "Tesis de grado durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno", Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2008.
4. Turno J., Banthia N., Gettu R., Barragán B.: "Estudio del comportamiento a cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras", *Materiales de construcción*, Vol. 58 (2008) 5-13.
5. Altoubat S., Roesler J., Lange D., Rieder K.: "Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers", *Construction and Building Materials*, Vol. 22 (2008) 384-393.
6. Bencardino, F.; Rizzuti, L.; Spadea, G. y Swamy, R.N. "Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3) (2008), pp. 255-263.
7. Balaguru P, Shah S.: "Fibre-reinforced cement composites". MacGraw-Hill, New York, 1992.
8. Buratti, N., Mazzotti, C. and Savoia, M. Post-cracking behaviour of steel and macrosynthetic fibre reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25, no. 5, p. 2713-2722.
9. Soutsos, M.; Lampropoulos A.: "Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres". *Construction and building materials*, Vol. 36 (2012) 704-710.
10. Laranjeira F, Aguado A., Molins C.: "Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers", *Materials and Structures* Vol. 43 (2010) 875-895.
11. Shannag J., Brincker R., Hansen W.: "Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites", *Cement and Concrete Research*. Vol. 27 (1997) 925-936.
12. Yining D.: "Investigations into the relationship between deflection and crack mouth opening displacement of SFRC beam", *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (2011) 2432-2440.
13. CEB FIB, "Model Code 2010, First complete draft", Vol. 1 International for structural concrete fib, Switzerland (2010) 220-231.
14. Hillerborg A.: "The theoretical basis of method to determine the fracture energy GF of concrete". *Mater. Struct.*, Vol. 18 (1985) 291-296.
15. Cheng Y., Panchmatia P., Sivaram A.: "Analysis of fracture energy: comparative study of PCC & FRC". Purdue University, EUA, 2011.

Recibido el 19 de Abril de 2013

En forma revisada el 3 de Febrero de 2014