EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EQUIVALENTE DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA REFORZADO CON FIBRAS SINTÉTICAS PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES

C. G. MERCADO, I. FLORES, A. DURÁN

Facultad de Ingeniería Civil, (FIC-UANL), Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México.

RESUMEN

El objetivo de la investigación es proporcionar un método simplificado para evaluar la resistencia a la flexión equivalente del concreto de alta resistencia reforzado con macro-fibras sintéticas para aplicaciones estructurales mediante pruebas de flexión a cuatro puntos en vigas ranuradas. Los resultados muestran que la adición del 1.00% y 1.25% de fibras permiten mantener carga post-agrietamiento aproximadamente del 50% y 60% de la carga de ruptura, respectivamente. El método de prueba utilizado para la evaluación no ha sido ampliamente estudiado, sin embargo, ha mostrado describir satisfactoriamente el comportamiento a la flexión de acuerdo con los resultados obtenidos.

Palabras clave: flexión equivalente; macro-fibras sintéticas; concreto de alta resistencia.

ABSTRACT

The objective of the research is to provide a simplified method to evaluate the resistance to bending equivalent strength to the high strength concrete reinforced with synthetic macrofibers for structural applications in bending tests to four points in grooved beams. The results show that the addition of 1.00% and 1.25% of the fibers allows to maintain the load after cracking approximately 50% and 60% of the breaking load, respectively. The test method used for the evaluation has not been widely studied, however, it has been described correctly.

RESUMO

O objetivo deste projeto é fornecer um método simplificado para avaliar a resistência à flexão equivalente do concreto de alta resistência reforçado com macrofibras sintéticas para aplicações estruturais por meio de testes de flexão de quatro pontos em vigas ranhuradas. Os resultados mostram que a adição de 1,00% e 1,25% de fibras permite manter cargas pós-fissuras de aproximadamente 50% e 60% da carga de ruptura, respectivamente. O método de teste utilizado para a avaliação não tem sido amplamente estudado, no entanto, os resultados mostraram que descreve satisfatoriamente o comportamento do concreto a flexão.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El concreto es un material con amplia gama de aplicaciones en la industria de la construcción debido a sus propiedades mecánicas y de durabilidad a un costo relativamente bajo, comparado con otros materiales de construcción. Además, su fabricación es relativamente fácil ya que no requiere de técnicas muy avanzadas y mano de obra especializada para su fabricación y colocación, sin dejar de lado que puede moldearse en gran variedad de formas de acuerdo con su aplicación. Por lo anterior, el concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial. Sin embargo, es un material con poca capacidad de deformación antes de la fractura y baja resistencia a la tensión (aproximadamente entre un 10% y 15% de la resistencia a la compresión).

El desarrollo de aditivos químicos, fibras y el uso de materiales cementantes suplementarios (MCS) en la fabricación de concreto hidráulico han logrado mejorar sus propiedades en estado fresco y endurecido, adoptando el término de concreto de alto desempeño (CAD). Generalmente se producen con relaciones de agua entre el material cementante (a/mc) en el rango de 0.2 a 0.4 y altos contenidos de cementantes (400 kg/m^3 a 600 kg/m^3), por lo que no se pueden evitar los cambios de volumen como resultado del secado, las reacciones químicas y el cambio de temperatura. Por esta razón la contracción y el agrietamiento del concreto son fenómenos frecuentes. Para reducir y/o controlar este fenómeno, la adición de fibras al concreto juega un papel importante en el desempeño del CAD; ya que mejora su comportamiento al agrietamiento, evitando el crecimiento, propagación y coalescencia de las grietas. Además, se ha demostrado que le proporciona la capacidad de sostener cargas después del agrietamiento, de tal manera que puede considerarse como refuerzo secundario e incluso primario en determinadas aplicaciones estructurales.

1.2. Justificación del problema

En las últimas décadas, las fibras han tomado mucha popularidad para el desarrollo de concreto de alto desempeño reforzado con fibras (CADRF), en especial las fibras de acero, debido a su efectividad para mejorar el comportamiento post-agrietamiento. Sin embargo, las fibras de acero tienen algunas desventajas como su alta densidad, la dificultad para trabajarlas a volúmenes relativamente bajos y principalmente los problemas por ataques de corrosión. Por lo anterior, los investigadores han buscado fibras de otros materiales con mejores propiedades y que tengan eficiencia estructural.

Se debe admitir que el costo del refuerzo con fibra y las operaciones tecnológicas relacionadas es sin duda un obstáculo para su uso en estructuras ordinarias. Sin embargo, la aplicación de fibras en estructuras exigentes satisface requisitos muy especiales. Una ventaja muy importante del concreto reforzado con fibras (CRF) es la reducción en el tiempo de construcción en comparación con los sistemas constructivos convencionales con barras de refuerzo y malla electrosoldada. En proyectos a gran escala y/o de formas irregulares, la reducción del refuerzo tradicional mejora la movilidad y la seguridad del personal, además de la reducción de mano de obra necesaria para la colocación. Por lo que en esta investigación se estudia el desempeño de las macro-fibras sintéticas de polipropileno/polietileno como refuerzo de un concreto de alta resistencia.

1.3. Antecedentes

Las fibras han sido utilizadas como material de construcción en concreto premezclado, prefabricados y concreto lanzado, su incorporación en el concreto puede prevenir y controlar el agrietamiento, así como la propagación y coalescencia de estas. Sin embargo, los volúmenes de adición en el concreto son bajos debido a que grandes cantidades reducen la trabajabilidad de la mezcla y afectan la dispersión de las fibras. Un gran desafío durante la aplicación de las fibras es la necesidad de eliminar el enlace mecánico (ganchos), siempre y cuando la eficiencia en su rendimiento sea compensada con un costo más reducido

de las fibras lisas. El desarrollo de macro-fibras sintéticas busca sustituir a las fibras de acero en aplicaciones estructurales; sin embargo, el comportamiento mecánico del concreto reforzado con este tipo de fibras aún es limitado.

Buratti et. al. compararon el desempeño del concreto reforzado con fibras de acero y tres tipos de macro-fibras sintéticas mediante pruebas de flexión de tres puntos en vigas ranuradas. Utilizaron como mezcla de referencia un concreto con resistencia a la flexión de 4.3 ± 0.3 MPa; la resistencia a la compresión osciló entre 40 MPa y 50 MPa.

La adición del 0.52% volumen de fibras sintéticas muestran un comportamiento en resistencia a la compresión y a la flexión en el límite de proporcionalidad muy similar, e incluso ligeramente mayor en comparación a la mezcla con un 0.45% volumen de fibras de acero. Por otra parte, la resistencia residual promedio normalizada es aproximadamente 40% mayor en las mezclas con fibras de acero; sin embargo, muestran una mayor variación en sus resultados (4).

(Lee et. al., 2016) estudiaron el comportamiento del concreto reforzado con macro-fibras de polipropileno de alta resistencia mediante pruebas de flexión de cuatro puntos. Se probaron cuatro volúmenes diferentes de adición de fibras (0.25%, 0.50%, 0.75% y 1.00%) y tres clases de concreto (30 MPa, 40 MPa y 60 MPa). Encontraron que las mezclas con 0.25% y 0.50% volumen de fibras no cumplen con los requisitos mínimos para aplicaciones estructurales; las mezclas con 0.75% y 1.00% volumen de fibras muestran un excelente desempeño en concreto de 60 MPa. Un aspecto importante por destacar es que el desempeño de la adición de fibras incrementa al aumentar la resistencia del concreto (5).

(Hardy et. al., 2018) modelaron el efecto de la adición de 0.60% y 1.00% volumen de fibras sintéticas en concreto de 40 MPa para la aplicación en rompeolas, a partir de los resultados obtenidos de pruebas de tensión directa y de flexión. Los resultados de la modelación de los elementos bajo cargas de impacto mostraron que ambos volúmenes de fibras resistían aproximadamente la misma cantidad de impactos, alrededor de un 100% más que la mezcla de referencia (6).

(Kazmi et. al., 2018) evaluaron el efecto de las macro-fibras sintéticas de polipropileno en el comportamiento mecánico de concreto con agregado reciclado. Se fabricaron mezclas con tres volúmenes de sustitución de agregado reciclado (0%, 50% y 100%) y tres volúmenes de adición de fibras (0.00%, 0.50% y 1.00%). Los resultados de los ensayos de compresión en cilindros de 15x30 cm muestran un incremento entre el 5% y 9% en la resistencia al aumentar el volumen de fibras. Por otra parte, los ensayos de flexión en vigas ranuradas con 1.00% de adición de fibras mostraron un incremento aproximadamente del 100% en la resistencia a la flexión post-agrietamiento con respecto al 0.50% de adición de fibras para todas las mezclas, además, se obtuvo un incremento del 9% en la carga de fractura (7). Las mezclas con 1.00% de adición de fibras cumplen satisfactoriamente los requisitos establecidos para la aplicación en aplicaciones estructurales para la clase de concreto utilizado (40 MPa a 50 MPa).

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

El cemento portland utilizado es un CPO 40R, también se utilizó microsílice (HS). La composición química obtenida mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X, y así como las características físicas del CPO 40R y del HS se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química y propiedades físicas de los cementantes

Composición química			Propiedad Física		
Material	CPO 40R	HS	Material	CPO 40R	HS
CaO, %	51.39	0.16	Densidad, g/cm ³	3.04 ± 0.02	2.19 ± 0.01
SiO ₂ , %	34.36	99.43	Color	Gris verdoso	Azul de Prusia
SO ₃ , %	8.20	--			
Al ₂ O ₃ , %	2.98	--			
Fe ₂ O ₃ , %	1.26	0.03			
K ₂ O, %	1.06	0.26			
MgO, %	0.71	0.05			
Otros, %	0.04	0.08			

Se utilizó un aditivo a base de policarboxilatos, el cual es un líquido color ámbar oscuro, con una densidad específica de 1.11 g/cm³ de acuerdo con la ficha técnica y un contenido de sólidos del 58.5%. Las fibras utilizadas son una mezcla autofibrilante de polipropileno/polietileno. De acuerdo con la ficha técnica tiene, entre otras, las siguientes características: densidad específica de 0.92 g/cm³, 51 mm de longitud, 600 MPa a 650 MPa de resistencia a la tensión, módulo de elasticidad de 9.5 GPa. Los agregados utilizados son triturados de caliza típicos de la región de Nuevo León. Sus propiedades físicas se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 1.

Tabla 2. Propiedades físicas de los agregados pétreos

Material	Densidad, g/cm ³	Absorción, %
Grava	2.63	0.74
Arena	2.68	1.69

Figura 1. Distribución granulométrica de los agregados pétreos

2.2. Preparación de las pastas de cemento

El aditivo se disolvió en el agua y el procedimiento de mezclado para la pasta fue el indicado en ASTM-C305. Las medidas de mini-revenimiento se realizaron utilizando un mini-cono con las características que se muestran en la Figura 2, el cual se colocó en un vidrio humectado para tener una superficie horizontal lisa. Posteriormente se llenó con el material y se levantó cuidadosamente en 1 s aproximadamente. Una vez que la pasta se quedó estática se hicieron cuatro mediciones del diámetro

con aproximadamente 45° entre una y otra a los 5, 30, y 60 minutos después de poner en contacto el cemento con el agua. Para las lecturas de 30 y 60 minutos se guardó el material en una bolsa ziploc para evitar la pérdida de agua por evaporación. Posteriormente, se colocaron en la olla y se mezclaron a velocidad baja por 30 segundos para efectuar la medición del mini-revenimiento.

Figura 2. Dimensiones del cono para medir mini-revenimiento

2.3. Preparación de las mezclas de concreto

El proporcionamiento para mezclas de concreto convencional no es aplicable para el concreto con fibras y aún no se tienen procedimientos estandarizados, ya que depende en gran medida de las características, el tipo de fibra y la distribución granulométrica de los agregados. Por lo que en base a los procedimientos de ACI 211.1 y las recomendaciones de ACI 544.1R se propuso el siguiente procedimiento de diseño.

- ❖ Se toma como referencia las proporciones de los materiales de la mezcla de control (sin fibras).
- ❖ Debido a que las fibras tienen mayor área superficial que el agregado grueso (AG), se requerirá mayor cantidad de mortero para distribuir las fibras dentro de la mezcla. Por lo que se calcula la equivalencia en peso de las fibras al AG con relación a sus áreas superficiales. Para lo cual, los agregados se idealizan esféricos del tamaño de la malla en la que son retenidos y las fibras como filamentos circulares con las dimensiones especificadas en la ficha técnica que proporciona el proveedor. Se resta el valor obtenido en el punto anterior de la cantidad de AG y se recalcula el volumen de la mezcla.
- ❖ La diferencia de volumen para completar 1 m³ se complementa con proporciones de los materiales igual a la mezcla de control.

2.4. Evaluación de las propiedades en estado endurecido

Para evaluar el comportamiento mecánico del concreto se realizaron pruebas de compresión y flexión. Los ensayos de compresión se realizaron a edades de 1, 3, 7, 28 y 90 días en cilindros de 10x20 cm. Los cilindros para los ensayos de compresión fueron previamente cabeceados con mortero de azufre de alta resistencia. El ensaye se realizó bajo condiciones de deformación controlada (0.2 mm/min) y para lo cual se hicieron pruebas preliminares, de tal manera que la duración de cada ensaye estuviera cercana a lo establecido por ASTM-C39, cuando se realiza por velocidad de carga controlada. Además, se colocaron 2 LVDT's diametralmente opuestos para medir las deformaciones, para determinar el módulo

de elasticidad y relación de Poisson. El módulo de elasticidad se calculó de acuerdo con la ASTM-C469. En la Figura 3 se muestran los detalles de la configuración de la prueba.

Figura 3. Configuración de los ensayos de compresión y módulo de elasticidad

Figura 4. Configuración de los ensayos de flexión

Para la resistencia a la flexión equivalente se realizaron ensayos de flexión en cuatro puntos a 28 días en vigas de 15x15x50 cm. Previamente se les hizo un entalle de 2.5 ± 0.1 cm (ranura) al centro del claro para tener control del agrietamiento y de las mediciones. El ensaye se realizó bajo condiciones de deformación controlada (0.2 mm/min) hasta una deflexión mayor a 3 mm y/o apertura de grieta mayor a 3.5 mm. Se colocó un LVDT y un CMOD al centro del claro para medir la deflexión y la apertura de grieta, respectivamente. La resistencia a la flexión equivalente se determinó de acuerdo con ASTM-C1609. En la Figura 4 se muestran los detalles de la configuración de la prueba.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Compatibilidad y dosificación de aditivo superplastificante

Como se puede observar en la Figura 5 las dosificaciones de aditivo por debajo del 0.6% presentan una ligera pérdida de extensibilidad al término de 60 minutos, lo cual puede atribuirse a que la cantidad aditivo no es la suficiente para dar y/o mantener el efecto dispersante durante ese periodo de tiempo. Mientras que las dosificaciones superiores al 1.30% tienen un ligero aumento de extensibilidad al cabo de 30 y 60 minutos con respecto a las mediciones de 5 minutos, esto se puede atribuir a que existe una saturación o sobresaturación de aditivo el cual sigue surtiendo efecto entre los 5 y 30 minutos. Por otra parte, las dosificaciones entre 0.6% y 0.8% mantienen aproximadamente la misma extensibilidad en un lapso de 60 minutos. Con base en lo anterior, y en la Figura 6 se puede decir que la dosificación óptima de aditivo se encuentra entre 0.5% y 0.8%.

Figura 5. Retención de la consistencia de las pastas

3.2. Diseño de las mezclas de concreto

La Figura 7 muestra las distribuciones granulométricas combinadas utilizadas para las mezclas con diferentes volúmenes de fibra, como se puede observar algunas mallas de estas distribuciones se salen ligeramente de los límites recomendados por ACI 544.1R. Sin embargo, con base en observaciones visuales de uniformidad y homogeneidad cumplen satisfactoriamente. Por otra parte, con base en la Tabla 3 se puede decir que la metodología adoptada para el diseño de mezclas es adecuada, ya que el ajuste de revenimiento fue mínimo y la afectación de la trabajabilidad es despreciable.

Figura 6. Dosificación óptima de aditivo superplastificante

Tabla 3. Dosificación de aditivo con relación al volumen de fibras % Volumen de fibras

% Volumen de fibras	0	0.5	0.75	1	1.25
% SP/mc	0.3	0.32	0.34	0.36	0.37

Figura 7. Distribuciones granulométricas recomendadas por ACI 544.1R

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 4 y la Figura 8 se puede observar que el volumen de adición de fibras no tiene ningún efecto positivo o negativo considerable en la resistencia máxima a la compresión y el módulo de elasticidad del concreto. Sin embargo, después de alcanzar la carga máxima se puede apreciar el efecto de las fibras en el comportamiento post-agrietamiento.

Tabla 4. Resistencia a la compresión promedio y módulo de elasticidad

% Fibras	Resistencia a la compresión (MPa)				Módulo de elasticidad (GPa)
	1 día	3 días	7 días	28 días	
0.00	37.8	47.8	56.1	63.8	40.0
1.00	37.4	48.3	57.3	61.3	40.5
1.25	36.0	47.9	55.1	60.9	39.5

Figura 8. Desarrollo de resistencia a la compresión

Como se puede observar en las Figuras 9 y 10 la resistencia a la compresión post-agrietamiento de las mezclas con 1.00% de adición de fibras aumenta ligeramente con el paso de los días, mostrando un aumento alrededor del 40% entre 1 y 28 días. Mientras que las mezclas con 1.25% de adición de fibras no presentan el mismo comportamiento, mostrando un mejor desempeño a los 3 días, aproximadamente un 25% mayor a las demás. Cabe mencionar que las mezclas con el 1.00% de fibras muestran un mejor desempeño que las mezclas con 1.25% de fibras, por lo que, se puede decir que tienen una mejor distribución dentro de la matriz cementante debido a que teóricamente la calidad del concreto es igual y por lo tanto la zona de transición interfacial entre la pasta y la fibra también lo es.

Figura 9. Resistencia a la compresión de las mezclas con 1.00% de fibras

Figura 10. Resistencia a la compresión de las mezclas con 1.25% de fibras

En la Figuras 11 a 16 se muestran las gráficas de carga-deflexión de las pruebas de flexión en 4 puntos, como se puede observar al alcanzar la carga máxima la caída de resistencia es abrupta cuando los volúmenes de fibra son bajos (0.50% y 0.75%); sin embargo, esto mejora cuando el volumen aumenta al 1.00% y 1.25%. El código ACI 544.7R establece que para considerar el aporte de las fibras como parte del refuerzo secundario y/o primario en aplicaciones estructurales se debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{P_{0.75\text{mm}}}{P_{LP}} = 0.4 \quad (1)$$

$$\frac{P_{3\text{mm}}}{P_{0.75\text{mm}}} = 0.5 \quad (2)$$

Con base en los datos de las Tablas 6 y 7 y las recomendaciones de ACI 544.7R la adición de fibras del 1.00% y del 1.25% cumplen satisfactoriamente los requisitos para el uso como refuerzo secundario y/o primario en aplicaciones estructurales.

Figura 11. Resultados de las pruebas de carga-deflexión en vigas con 1.00% de fibras

Figura 12. Resultados de las pruebas de carga-deflexión en vigas con 1.25% de fibras

Tabla 5. Resultados de resistencia a la flexión equivalente (carga-deflexión)

% VF	P _{LP} , N (kg)	P _{0.75} /P _{LP} (%)	P ₃ /P _{0.75} (%)
1.00	31435(3200)	52	96
1.25	34087(3475)	63	107

Figura 13. Resumen de los resultados de carga-deflexión

Figura 14. Resultados de las pruebas de carga-apertura de grieta en vigas con 1.00% de fibras

Figura 15. Resultados de las pruebas de carga-apertura de grieta en vigas con 1.25% de fibras

Tabla 6. Resultados de resistencia a la tensión equivalente (carga-apertura de grieta)

% VF	P _{LP} , N (kg)	P _{0.50} /P _{LP} (%)	P _{2.5} /P _{0.50} (%)
1.00	31435(3200)	48	115
1.25	34087(3475)	57	120

Figura 16. Resumen de los resultados de carga-apertura de grieta

4. CONCLUSIONES

- ❖ Con base en las pruebas para la de dosificación de aditivos y ensayos en mezclas de prueba se tiene que la dosificación máxima de aditivo se encuentra entre el 0.6% y 0.8% con relación al peso de material cementante para una relación $a/mc = 0.33$.
- ❖ La metodología para diseñar las mezclas de concreto con fibras resultó ser adecuada, ya que se tuvo una afectación mínima en el revenimiento.
- ❖ Se tuvo una disminución aproximadamente del 4% en la resistencia a la compresión de las mezclas con 1.00% y 1.25% volumen de fibras en los ensayos a 28 días, respecto a la mezcla de control.

- ❖ La adición de fibras en volúmenes de 1.00% y 1.25% cumplen satisfactoriamente con los requisitos para el uso como refuerzo secundario y/o primario en aplicaciones estructurales.
- ❖ La resistencia en el límite de proporcionalidad a la flexión aumenta aproximadamente un 10% para el 1.25% de adición de fibras con respecto a los otros volúmenes de adición.
- ❖ El 1.00% de adición de fibras aumentó en un 148% la resistencia residual a la flexión con respecto al 0.50% de adición de fibras, mientras que el 1.25% de adición de fibras aumentó un 227%.

5. AGADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CEMEX y a EUCOMEX por la donación de los materiales, a la Subdirección de Investigación por la aceptación del proyecto PAIFIC/2018-13, así como al Laboratorio de Tecnología del Concreto, Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de construcción, a los alumnos Atzin Barragán, Jared Hernández y Leonardo Aranda que contribuyeron para la realización de este proyecto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- American Concrete Institute (2008). *ACI 211.4R-08 Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials*.
- American Concrete Institute (2016). *ACI 544.7R-16 Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments*
- ASTM International. (2006). *ASTM C305-06 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. <https://doi.org/10.1520/C0305-06>
- ASTM International. (2009). *ASTM C39/39M-09a Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-09A
- ASTM International (2002). *ASTM C469-02 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. <https://doi.org/10.1520/C0469-02>
- ASTM International (2010). *ASTM C1609/1609M-10 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-10
- Hardy, N.; Foster, S.; Cox, R.; Goudarzi, H.; Amin, A. (2018), *Investigation into the use of macro synthetic fibre reinforced concrete for breakwater armour units*. *Coastal Engineering* 140 (2018) 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.06.004>
- Kazmi, S.; Munir, M.; Wu, Y.; Patnaikuni, I. (2018), *Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete*. *Construction and Building Materials* 189 (2018) 857–868. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.161>
- Lee, J.; Cho, B.; Choi, E.; Kim, Y. (2016), *Experimental study of the reinforcement effect of macro-type high strength polypropylene on the flexural capacity of concrete*. *Construction and Building Materials* 126 (2016) 967–975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.017>