

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO HIDRÁULICO SIMPLE Y EL REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN PLAIN CONCRETE AND STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

Por / By José Castañeda Ávila, Cecilia Olague Caballero, Facundo M. Almeraya Calderón, Citlalli Gaona Tiburcio y Alberto Martínez Villafañe.

Pág. 20-27

Resumen

En este estudio se comparan las propiedades mecánicas (módulo de ruptura, resistencia a la flexión, tenacidad, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad) y de durabilidad (resistencia a la corrosión) del concreto reforzado con fibras de acero (CRFA), además de obtener la concentración óptima de fibras de acero que pueden ser adicionadas al concreto hidráulico, empleando los aditivos y agregados utilizados en la ciudad de Chihuahua, Chih. Al CRFA se le hicieron pruebas de trabajabilidad y consistencia (revenimiento), y peso volumétrico en estado fresco. Para conocer la tenacidad del CRFA se emplearon tres métodos (ASTM C 1018, JSCE SF4 y PCS). Las pruebas aceleradas de corrosión se llevaron a cabo mediante cámaras de niebla salina, humedad relativa, inmersión en agua, y en medio ambiente. Las fibras tuvieron buen comportamiento ante los agentes corrosivos, a pesar de que éstas no contaban con ningún recubrimiento o tratamiento anticorrosivo. La cantidad óptima de fibras para el CRFA, de acuerdo al parámetro de tenacidad, durabilidad y al comportamiento del concreto en estado fresco, es de 30 kg/m³ de concreto, en virtud de que la tenacidad es máxima.

Palabras clave: concreto, concreto reforzado con fibras de acero, fibras de acero, tenacidad, absorción de energía, corrosión, flexión, compresión, especificaciones, propiedades mecánicas, trabajabilidad.

Abstract

Mechanical properties (module of rupture, resistance flexure, toughness, resistance compressive and module of elasticity) and durability properties (resistance to corrosion) on steel fiber reinforced concrete (SFRC) and plain concrete were compared. In addition, the best rate of steel fibers added to concrete was obtained, using admixtures and aggregates typically used in Chihuahua City, Mexico. Fresh SFRC was tested for workability and consistency (slump), and volumetric weight. In order to determine toughness of SFRC were used three methods (ASTM C 1018, JSCE SF4 and PCS). The accelerate of corrosion tests were carried out by cabinets of salt spray (fog), relative humidity, immersion in water, and environmental exposition. Steel fibers had good behavior with corrosive agents, although they did not have any coating or anticorrosive treatment. The best rate of fibers in SFRC, according to toughness, durability and fresh concrete performance was 30 kg/m³ of concrete, since toughness was the maximum obtained.

Keywords: concrete, steel fiber reinforced concrete, steel fibers, toughness, energy absorption, corrosion, flexural strength, compressive strength, specifications, mechanical properties, workability.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las tres últimas décadas de investigaciones y los trabajos desarrollados, junto con un amplio rango de aplicaciones prácticas, se ha confirmado que los compuestos de cemento con fibra son fiables y eficientes y que pueden ser materiales económicos de construcción cuando se usan inteligentemente.

Las características de fragilidad del concreto simple, lo limitan a ser utilizado en los casos en donde

trabaje a compresión. Estas deficiencias se pueden reducir incorporando al concreto fibras.

La capacidad, que tiene el concreto reforzado con fibras (CRF), de absorber energía (tenacidad) se debe a pequeñas microfisuras que se abren de manera uniforme, pero cuya propagación es controlada por las fibras. Las fibras son filamentos delgados y alargados de cualquier material, ya sea de origen sintético, mineral u orgánico, que tienen la capacidad de ser distribuidos en una mezcla fresca de concreto hidráulico.

Los principales parámetros que han sido empleados para describir a las fibras son la relación de aspecto ($\lambda = l/d$; donde: l = longitud de la fibra, d = diámetro o diámetro). El desempeño de un concreto reforzado con fibras (CRF) depende en gran parte de la susceptibilidad de las fibras a ser dañadas físicamente durante el proceso de mezclado, su compatibilidad química con el ambiente alcalino dentro de la pasta de cemento, entre otras.

Dos consideraciones primarias del uso del concreto reforzado con fibra (CRF) son: a) el mezclado correcto de las fibras para prevenir acumulaciones y, b) el manejo, colocación del CRF con una consistencia muy plástica.

La razón principal de usar fibras en casi todos los compuestos tradicionales es para mejorar la resistencia a la tensión.

Nota: El concreto reforzado con fibras de acero no substituye al acero de refuerzo en ningún caso.

Los principales objetivos de esta investigación son:

- Hacer un análisis comparativo entre los dos concretos, simple y reforzado con fibras de acero, dicho análisis trata de algunas propiedades y de durabilidad (resistencia a la corrosión) para nuestras condiciones, es decir, con los aditivos y agregados empleados en la ciudad de Chihuahua, Chih.
- Obtener el porcentaje óptimo de fibras de acero que se le pueden añadir a la mezcla de cemento Portland (Tipo I). Apoyándonos en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero.
- Conocer la susceptibilidad a la corrosión de las fibras de acero en el concreto, mediante pruebas aceleradas de corrosión (en cámaras de niebla salina, humedad relativa e inmersión en agua), tomando como patrón de comparación el medio ambiente.

El concreto se elaboró con la dosificación necesaria para que tenga, a los 28 días de edad, una resistencia a la compresión de $f'c = 250 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ con un MR de $40 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$.

Los especímenes fueron sometidos a procesos de intemperismo acelerado, para así conocer la susceptibilidad a la corrosión de las fibras de acero.

Las pruebas desarrolladas son: peso volumétrico, trabajabilidad y consistencia, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión para conocer el módulo de ruptura, pruebas de tenacidad y pruebas de corrosión.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La buena calidad y la construcción económica con concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) requieren de la aprobación de la mezcla, colocación, acabado, curado y seguir estrictos procedimientos de control de calidad.

equivalente de la fibra), resistencia a la tensión, elongación, adherencia, estructura, forma geométrica y textura superficial de la fibra.

Generalmente, el equipo tradicional usado en la construcción con concreto normal o simple no tiene que ser modificado para la construcción con CRFA.

En esta investigación se realizaron cinco mezclas de concreto, variando solamente el contenido de fibra y la cantidad de aditivo reductor de agua manteniendo la relación agua/cemento constante. A una mezcla (mezcla A) no se le incluyeron fibras, en tanto que a las otras cuatro (mezclas B, C, D, E) se les varió el contenido de fibras de 15 a 60 kg/m^3 de concreto (aproximadamente de 0.2 a 0.8% de fibra de acero en volumen), puesto que el Comité ACI 544 recomienda emplear de 23 a 60 kg/m^3 de concreto para mezclas con un tamaño máximo de agregado de 0.019 m.

El mezclado del CRFA puede ser aceptable mediante varios métodos, la elección del método depende de las condiciones del trabajo y de los medios disponibles. Esto es importante para tener una dispersión uniforme de las fibras y para prevenir la segregación y la acumulación de fibras durante el mezclado.

2.1. Materiales

Las fibras empleadas en este estudio son, de acuerdo a la Norma ASTM A 820, Tipo I (alambres estirados en frío). Se utilizaron fibras de acero con ganchos en los extremos con designación ZC 60/1.00 sin protección anticorrosiva.

La designación "ZC" indica que las fibras están unidas en peines (de 34 fibras las de este estudio) mediante un pegamento soluble en agua. Esto crea una relación de aspecto ($\lambda = l/d$) baja para la fibra cuando ésta es añadida a la mezcla, lo cual ayuda en la revoltura a eliminar los grumos de fibras, garantizándose una homogénea distribución de las fibras dentro del concreto (véase Figura 1). Los contenidos de fibras empleados son de 0, 15, 30, 45 y 60 kg/m^3 de concreto.



Figura 1. Fibras de acero unidas en peines para mejorar el mezclado y dispersar las fibras por todo el concreto.

Se empleó cemento Portland Tipo I, el cual satisface la Norma ASTM C 150.

El agregado fino usado fue arena natural, en tanto el agregado grueso empleado fue piedra caliza triturada con un tamaño máximo de 0.19 m.

El agua utilizada fue de la llave del sistema de suministro municipal.

Se utilizó un aditivo reductor de agua líquido (POZZOLITH 360-N), mismo que cumple con la Norma ASTM C 494 para aditivos Tipo A.

No es necesario contar con equipo sofisticado para transportar y manejar el concreto reforzado con fibras de acero en estado fresco.

2.2. Procedimiento de Mezclado del CRFA

Las fibras, al ser incorporadas en una matriz de concreto mediante un proceso de mezclado convencional, se someten a un considerable maltrato de esfuerzos de flexión y abrasión.

Dichos esfuerzos deberán ser soportados por las fibras para que éstas no pierdan su relación de aspecto y resistencia.

La secuencia de mezclado es importante para prevenir aglomeraciones de las fibras. Es necesario que las fibras se dispersen uniformemente en toda la revoltura. Las causas principales por las cuales las fibras se acumulan o amontonan son: a) cuando se añaden a la mezcla demasiado rápido las fibras; b) cuando se añaden cantidades grandes de fibras (aproximadamente más del 2% del volumen de la mezcla ó 1% de fibra con una alta relación de aspecto); c) el revolver demasiado el concreto y; d) cuando se utiliza una gran cantidad de agregado grueso (más del 55%, en volumen, del total del agregado).

2.3. Fabricación de Especímenes

Los especímenes de prueba fueron vigas de $0.15 \times 0.15 \times 0.60$ m, para módulos de ruptura (ASTM C 78) y pruebas de tenacidad (ASTM C 1018) a los 7 y 28 días de edad. Estos prismas se elaboraron empleando moldes. Acompañando a estas vigas se hicieron especímenes cilíndricos de 0.15 m de diámetro por 0.30 m de altura (0.15×0.30 m), para esfuerzos de compresión (ASTM C 39), módulos de elasticidad (ASTM C 469), estos cilindros se fabricaron para ser probados a los 7 y 28 días. De igual manera se hicieron cilindros de 0.075×0.15 m, en base a Norma ASTM, para pruebas de corrosión.

De acuerdo a la Norma ASTM C 1018 (Ref. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS), el tamaño máximo del agregado y las dimensiones de los especímenes de prueba se apegaron a la Norma ASTM C 31 o ASTM C 192, ésta última es aplicable cuando se emplean especímenes colados en moldes (laboratorio).

2.4. Colado, Vibrado y Curado

Los procedimientos de colado, vibrado y curado para el concreto simple son aplicables al CRFA. En general el equipo convencional, empleado en el concreto simple, es

adecuado para colocar y darle el acabado al concreto reforzado con fibras de acero.

2.5. Trabajabilidad y Consistencia

Se registró el revenimiento de acuerdo a la Norma ASTM C 143 y peso volumétrico. La pérdida de las características del revenimiento del CRFA es similar al de un concreto simple (sin fibra). Se recomienda que el revenimiento del concreto simple (antes de agregarle la fibra) sea poco mayor que el revenimiento deseado para el concreto reforzado con fibra de acero, ya que las fibras hacen a la mezcla menos dócil.

2.6. Resistencia a la Compresión

Los cilindros se probaron a compresión a los 7 y 28 días de edad, conforme a la Norma ASTM C 39. A los 7 y 28 días también se probaron para los módulos estáticos de acuerdo con la ASTM C 469. El peso volumétrico en estado endurecido se calculó basándose sobre las dimensiones de los cilindros a los 7 y 28 días.

2.7. Resistencia a la Flexión

Las vigas fueron probadas a los 7 y 28 días a flexión para módulos de ruptura e índices de tenacidad con las Normas ASTM C 78 y ASTM C 1018, respectivamente.

2.8. Resistencia Última y Tenacidad

La tenacidad es utilizada ampliamente como parámetro de comparación de las características o propiedades de diferentes materiales, así como del concreto reforzado con fibras.

Las curvas carga-deformación obtenidas de varias mezclas de CRFA, se usaron para conocer la tenacidad mediante varios métodos (ASTM C 1018, JSCE SF4 y PCS).

En la prueba de flexión estática las vigas se cargaron en los tercios medios de acuerdo a la ASTM C 78 y ASTM C 1018. La carga y la deformación se tomaron a una velocidad constante en todos los casos.

2.9. Pruebas Aceleradas de Corrosión

Para las pruebas aceleradas de corrosión se utilizaron cámaras aceleradoras de la corrosión.

El objetivo de estas cámaras es controlar los factores que contribuyen a la corrosión y han sido muy usadas para evaluar y comparar a los materiales.

Las Normas ASTM empleadas en esta investigación, referentes a las cámaras utilizadas, son: para la cámara de niebla salina (ASTM B 117), cámara de humedad relativa (ASTM D 2247) y cámara de inmersión en agua (ASTM G 31).

En esta investigación se emplearon especímenes cilíndricos, con diámetros de 0.075 m y alturas de 0.15 m, para todas las pruebas aceleradas de corrosión y para los especímenes expuestos al medio ambiente. Dichos especímenes se expusieron en las cámaras y medio ambiente durante un mes.



Figura 2. Superficie fallada de un cilindro (concentración de fibra: 45 kg/m³).

Figura 3. Viga fracturada de concreto (concentración de fibra: 60 kg/m³).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Trabajabilidad y Consistencia

Los revenimientos indican que la trabajabilidad fue satisfactoria y se pudo mantener aparentemente igual, en algunas mezclas, con un contenido relativamente alto de fibras, considerando el tamaño máximo de agregado utilizado. Esto se consiguió ajustando la cantidad del aditivo reductor de agua, pero sin variar la relación agua/cemento. Se obtuvo un acabado satisfactorio en los especímenes de prueba. Sin embargo las mezclas con cantidades de fibra de 60 kg/m³ de concreto presentaron mayor dificultad. El revenimiento empleado es bueno para condiciones de campo donde no exista equipo automatizado, es decir donde se tenga que colocar el concreto de forma semi-manual y por lo mismo se requiera de mayor tiempo.

3.2. Resistencia a la Compresión

La adición de fibras en el concreto tuvo un incremento hasta 1.28 veces para la mezcla de 60 kg/m³, a los 7 días de edad, y a los 28 días de edad hubo un

incremento de 1.24 veces el concreto simple. En los cilindros de concreto, después de fallados, las fibras siguen uniendo a la matriz, haciendo al concreto un material dúctil (ver Figura 2 y Figura 4).

3.3. Resistencia a la Flexión

Comparando todos los concretos reforzados con fibras contra el concreto simple, los concretos con fibra de acero tuvieron poco incremento en los módulos de ruptura. Los módulos de ruptura no parecen haber tenido mucha influencia en el concreto reforzado con fibra de acero, dado que dicho módulo de ruptura es calculado basándose en la falla de la matriz de concreto y no en la falla de la fibra. Por esto, después de ser fallada la matriz, ésta cede el trabajo a la fibra, dándole ductilidad al CRFA. En tanto los módulos de ruptura máximos (calculados a partir de las cargas máximas), sí tuvieron gran incremento (1.88 veces más que el concreto simple) a los 28 días de edad. En la Figura 3 y Figura 5 se muestran vigas fracturadas después de practicarles pruebas de flexión.

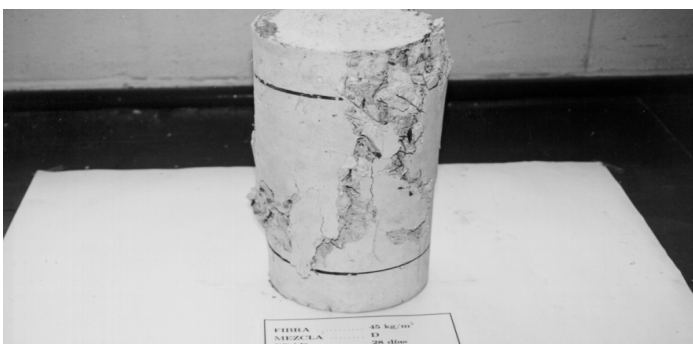


Figura 4. Cilindro de concreto fallado (concentración de fibra: 45 kg/m³).



Figura 5. Viga flexionada de CRFA, (concentración de fibra: 30 kg/m³).

3.4. Resistencia Última y Tenacidad

La buena adherencia se puede apreciar en las curvas carga-deformación. Las curvas indican un comportamiento dúctil (véase Figura 6 y Figura 7). Estas curvas también muestran la ventaja del concreto reforzado con fibras en comparación con el concreto sin fibras, ya que se obtuvo una mayor capacidad de carga, mayor esfuerzo máximo de flexión, mayor tenacidad, y excelentes características de absorción de energía. La energía absorbida aparente se

representa como el área total bajo la curva carga-deformación.

a) Método ASTM C 1018 (Ref. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS).

Con este método de prueba las mezclas D (45 kg/m³) y E (60 kg/m³) se comportaron más dúctiles que las demás. En la siguiente tabla se muestran estos valores para las mezclas D y E:

Tabla 1. Índices de Tenacidad obtenidos.

Material	Índices de tenacidad
CRFA (45 kg/m ³)	I ₅ = 6.65
	I ₁₀ = 15.05
	I ₂₀ = 15.05
CRFA (60 kg/m ³)	I ₅ = 9.98
	I ₁₀ = 19.34
	I ₂₀ = 19.34

Nota: No fue posible obtener más índices de tenacidad.

En una publicación hecha por los investigadores *Newkumar Banthia* y *Jean-François Trottier* (Ref BANTHIA, N. & TROTTIER, J) se muestran los resultados obtenidos con el método ASTM C 1018 en donde, según el criterio empleado (considerar la primera grieta: a) cuando la curva carga-deformación deja de ser lineal; b) cuando la curva carga-deformación cambia su trayectoria; y c) cuando la matriz cede trabajo a las fibras), varían considerablemente los valores aún con las mismas mezclas. Dichos valores se muestran a continuación en la De la Tabla 2.

De la Tabla 2, podemos observar las variaciones que existen con este método de prueba ASTM C 1018, como ya se mencionó, dependiendo del criterio empleado para identificar la primera grieta. El método ASTM C 1018 nos sirve para conocer y comparar la tenacidad de diferentes especímenes, empleando el mismo criterio en todos los casos; mas no para comparar resultados de diferentes métodos de prueba (ASTM C 1018, JSCE SF4, PCS). Puesto que dichos métodos se fundamentan con diferentes puntos de vista.

Tabla 2. Resultados de los Índices de Tenacidad según el criterio empleado en identificar la primera grieta.

Material	Índices de tenacidad		
	Primera grieta (0.0175 mm)*	Primera grieta (0.03 mm)**	Primera grieta (0.04 mm)***
CRFA (40 kg/m ³)	I ₅ = 5.73	I ₅ = 3.82	I ₅ = 3.33
	I ₁₀ = 10.94	I ₁₀ = 7.08	I ₁₀ = 5.96
	I ₂₀ = 21.27	I ₂₀ = 13.09	I ₂₀ = 11.15
	I ₃₀ = 31.62	I ₃₀ = 19.24	I ₃₀ = 16.50
	I ₆₀ = 61.42	I ₆₀ = 38.02	I ₆₀ = 32.85
Concreto sin refuerzo	I ₅ = 4.57	I ₅ = 1.65	I ₅ = 1.00

* Primera grieta: a) cuando la curva carga-deformación deja de ser lineal.

** Primera grieta: b) cuando la curva carga-deformación cambia su trayectoria.

*** Primera grieta: c) cuando la matriz cede trabajo a las fibras.

b) Método JSCE SF4 (Ref. JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS).

Con este método japonés, la mezcla C (30 kg/m³) registró mayor factor de tenacidad a la flexión a los 28 días de edad con una factor de tenacidad (FT) de 91×10⁴ kg/m². En tanto en la publicación *Newkumar Banthia y Jean-François Trottier* (Ref. BANTHIA, N. & TROTTIER, J), se obtuvo un factor de tenacidad (FT) de 55×10⁴ kg/m² para una mezcla con una concentración de fibra de 40 kg/m³.

Nótese que los valores son diferentes de un método a otro, ya que en el método ASTM C 1018 son índices y en este método los valores resultantes tienen unidades de kg/m³.

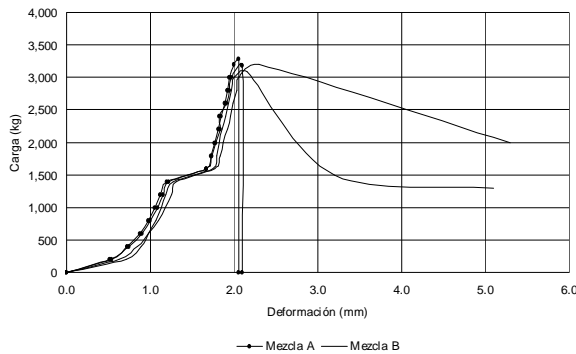


Figura 6. Curvas carga-deformación de vigas (concentración de fibra: 0 y 15 kg/m³).

3.5. Pruebas Aceleradas de Corrosión

Transcurrido el tiempo de exposición (30 días) de los cilindros de CRFA, estos fueron extraídos de las cámaras aceleradoras de corrosión y se procedió a cortarlos en tres partes, con la finalidad de analizar el deterioro de las fibras de acero, observándose que éstas no presentaban corrosión aparente. Las fibras se extrajeron de los cortes de cilindros para ser estudiadas en el microscopio óptico.

c) Método PCS (Esfuerzo de Post-Agrietamiento) (Ref. BANTHIA, N. & TROTTIER, J).

La propuesta del esfuerzo de post-agrietamiento (PCS: *Post-Crack Strength*) es desarrollada por los investigadores *Newkumar Banthia y Jean-François Trottier* (Ref. BANTHIA, N. & TROTTIER, J), dado que algunos de los métodos existentes no siempre se pueden aplicar, ya que en ocasiones no se obtienen las gráficas completas de la curva carga-deformación de los especímenes. El método PCS también sirve cuando existen errores o incertidumbre en los registros de las deformaciones. Según la referencia BANTHIA, N. & TROTTIER, J, para una concentración de fibra de 40 kg/m³, el valor de PCS₁₅₀ = 54×10⁴ kg/m².

Los mayores esfuerzos después de la primera grieta (PCS), se presentaron en la mezcla C (30 kg/m³).

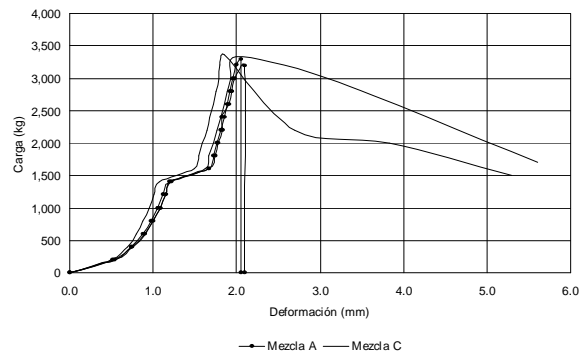


Figura 7. Curvas carga-deformación de vigas (concentración de fibra: 0 y 30 kg/m³).

De acuerdo con las observaciones realizadas en el microscopio estereoscópico se determinó clasificar el grado de corrosión de las fibras en el CRFA en bajo, medio y alto (la clasificación se basó en los porcentajes de fibras corroída, y no en lo severo de la corrosión, ya que ésta fue superficial, ver Tabla 3).

Tabla 3. Porcentajes y grados de corrosión de las fibras de acero expuestas en diferentes ambientes.

Especimen	Contenido de fibra (kg/m ³)	Cámara de niebla salina	Cámara de humedad relativa	Cámara de inmersión en agua	Medio ambiente*
B	15	100%-Alto	0%-Bajo	30%-Bajo	30%-Bajo
C	30	100%-Alto	0%-Bajo	17%-Bajo	25%-Bajo
D	45	100%-Alto	28%-Bajo	38%-Medio	17%-Bajo
E	60	100%-Alto	25%-Bajo	57%-Medio	17%-Bajo

* Temperatura de 303 a 308 K.

Nota: La corrosión de las fibras no fue severa en ninguno de los casos.

En la zona de anclajes o ganchos de las fibras es donde el material presenta mayores índices de corrosión, esto es debido a los cambios de sección en la fibra, ya que en estos cambios de sección es donde se presentan esfuerzos residuales.

Las mezclas B y C presentaron menor agresividad corrosiva, al tener grados de corrosión bajos excepto en la cámara de niebla salina donde todas las mezclas tuvieron un grado alto de corrosión. El grado de corrosión alto no indica

que la corrosión sea severa, sólo indica el porcentaje de fibras corroídas, ya que la corrosión que se presentó fue superficial.

En la Tabla 6 se muestran algunas de las ventajas (resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, módulo de ruptura máxima y tenacidad) que el concreto reforzado con fibras de acero tiene sobre el concreto simple.

Tabla 4. Ventajas del concreto reforzado con fibras de acero sobre el concreto simple a los 28 días de edad.

<i>Propiedad</i>	<i>Ventaja sobre el concreto simple (veces mayor)</i>
Resistencia a la compresión	1.10-1.24
Módulo de elasticidad	2
Módulo de ruptura *	1.08
Módulo de ruptura máxima **	1.88
Tenacidad *** (JSCE SF4)	1.88-2.30

*Cuando la matriz de concreto cede trabajo a las fibras.

** Contenido de fibra del 45 y 60 kg/m³.

*** Capacidad de un material para absorber energía.

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados de esta investigación se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El esfuerzo de compresión para el concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) se incrementó hasta un 24%.
2. El módulo de elasticidad, para el CRFA, aumentó de 2 a 3 veces más que el concreto simple.
3. El módulo de ruptura (carga cuando la matriz de concreto falla) para el CRFA no se incrementó considerablemente: para 15 kg/m³ (0.98), 30 kg/m³ (1.04), 45 kg/m³ (0.96) y 60 kg/m³ (1.09). Dado que la matriz de concreto es la que trabaja inicialmente y después cede trabajo a las fibras, haciendo al concreto reforzado con fibras de acero un material dúctil. El módulo de ruptura máximo (con la carga máxima registrada) del CRFA aumentó 1.88 veces más, cuando la concentración de fibras de acero era de 45 y 60 kg/m³ de concreto.
4. El porcentaje óptimo de fibra para el CRFA, de acuerdo al parámetro de tenacidad, durabilidad (pruebas de corrosión) y al comportamiento del concreto en estado fresco, es de 30 kilogramos de fibras de acero por metro cúbico de concreto (30 kg/m³, mezcla C). Por otra parte, las fibras deformadas con ganchos en los extremos, han dado buenos resultados en otras investigaciones con un contenido de fibras de 30 a 60 kg/m³ (Ref. BALAGURU, P.). Algunas bibliografías mencionan que a los 15 kg/m³ se obtienen buenos resultados prácticos (Ref. HARDING, M.).
5. La exposición del CRFA, en los tres tipos de ambientes corrosivos, sí presentaron corrosión en las fibras de acero, pero del tipo superficial. Sin embargo cuando exista una gran cantidad de cloruros (cámara de niebla salina) el deterioro superficial de las fibras de acero se incrementará con el tiempo. Considerando que las fibras se corroen cuando se exponen al medio ambiente, se recomienda especial cuidado en el proceso constructivo, asegurándose de que no queden fibras expuestas a un medio corrosivo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- BALAGURU, P. (1992)**, Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*. American Concrete Institute. Núm. 89-M59, pp. 541-546.
- BANTHIA, N. & TROTTIER, J. (1995)**, Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some Concerns and Proposition, *ACI Materials Journal*. U.S.A. 1995, pp. 48-57.
- CASTAÑEDA, J. (1998)**, Análisis Comparativo entre el Concreto Hidráulico Simple y el Reforzado con Fibras de Acero. Universidad Autónoma de Chihuahua. 128 pp.
- HARDING, M. (1996)**, Mezclado, Colocación y Acabado del Concreto Reforzado con Fibra, Publicación hecha en: *Concrete Construction* (Autorización de The Aberdeen Group), 1996 y en *Construcción y Tecnología* (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, IMCYC), 1997. 4 pp.
- MORGAN, D. A.**, Comparative Evaluation of Plain, Mesh and Steel Fiber Reinforced Concrete (SP-81-15), *ACI International*. pp. 307-323.
- TATNALL, P.**, Steel Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete, Bekeart Co, Marietta,
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1986)**, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-82), Comité ACI 544. 22 pp.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1997)**, ACI Manual of Concrete Practice. Part 5: Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.3R-93), Comité ACI 544. 10 pp.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (1997)**, ACI Manual of Concrete Practice. Part 5: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88), Comité ACI 544. 18 pp.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1994)**, ASTM C 1018-94b Standard Test Method for flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading), ASTM. U.S.A. 1994, 8 pp.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. (1984)**, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, Standard SF-4, 1984, pp. 58-66.

José Castañeda Ávila

Ingeniero Civil, M.I. en Vías Terrestres
Estudiante de Doctorado en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Departamento de Corrosión

Civil Engineer, Master in Engineering Transport Systems
Doctorate Student in Material Science
Advanced Materials Research Center
Corrosion Departmen
castanedaj@nurse.cimav.edu.mx

Cecilia Olague Caballero

Ingeniero Civil, M.I. en Vías Terrestres
Universidad Autónoma de Chihuahua
Civil Engib

colague@seidel.fing.uach.mx

Facundo Mauricio Almeraya Calderón.

Ingeniero en Metalurgia, Dr. en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Departamento de Corrosión
Miguel de Cervantes 120
Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México
Tel: (14) 39-11-35
Fax: (14) 39-11-12
www.cimav.edu.mx
almeraya@yakko.cimav.edu.mx

Citlalli Gaona Tiburcio.

Ingeniero en Metalurgia, Dr. en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Departamento de Corrosión
Miguel de Cervantes 120
Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México
Tel: (14) 39-11-34
Fax: (14) 39-11-12
www.cimav.edu.mx
citlalli@mail.cimav.edu.mx

Alberto Martínez Villafañe.

Licenciado en Físico-Matemáticas, Dr. en Ciencias de la Corrosión
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Departamento de Corrosión
Miguel de Cervantes 120
Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México
Tel: (14) 39-11-45
Fax: (14) 39-11-12
www.cimav.edu.mx
amvillaf@mail.cimav.edu.mx

*Advanced Materials Research Center
Division of Deterioration Materials
Corrosion Department*

José Castañeda Ávila.

*Advanced Materials Research Center
Corrosion Department
Miguel de Cervantes 120
Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México
Tel: (14) 39-11-11, ext. 7217
Fax: (14) 39-11-12
castanedaj@nurse.cimav.edu.mx*

Cecilia Olague Caballero.

*Civil Engineer, Master in Engineering Transport Systems
Chihuahua Autonomus University
Cd. Universitaria
Chihuahua, Chihuahua
Tel: (14) 13-77-66
www.cimav.edu.mx
colague@seidel.fing.uach.mx*

Facundo Mauricio Almeraya Calderón.

*Metallurgy Engineer, Ph. D. Material Science
Advanced Materials Research Center
Corrosion Department
Miguel de Cervantes 120
Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México
Tel: (14) 39-11-35
Fax: (14) 39-11-12
www.cimav.edu.mx
almeraya@yakko.cimav.edu.mx*

Citlalli Gaona Tiburcio.

*Metallurgy Engineer, Ph. D. Material Science

Corrosion Department
Miguel de Cervantes 120
Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México
Tel: (14) 39-11-34
Fax: (14) 39-11-12
www.cimav.edu.mx
citlalli@mail.cimav.edu.mx*

Alberto Martínez Villafañe.

*Bechelor Science in Physics and Mathematics, Ph. D. In Corrosion Science
Advanced Materials Research Center
Corrosion Department
Miguel de Cervantes 120
Complejo Industrial Chihuahua
31109 Chihuahua, Chih. México
Tel: (14) 39-11-45
Fax: (14) 39-11-12
www.cimav.edu.mx*

amvillaf@mail.cimav.edu.mx