

DESEMPEÑO A TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO RC-65/35-BN SOMETIDO AL EFECTO DEL ION CLORURO

JULIÁN CARRILLO ¹, JHON CÁRDENAS PULIDO ², WILLIAM APERADOR CHAPARRO ³

¹ Programa de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia.

e-mail: wjcarrillo@gmail.com.

² Programa de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia.

e-mail: u1100907@unimilitar.edu.co.

³ Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia.

e-mail: william.aperador@unimilitar.edu.co.

Recibido: enero 2015

Recibido en forma final revisado: abril 2015

RESUMEN

En el artículo se evalúa la influencia de dos ambientes corrosivos sobre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero, CRFA, tipo RC-65/35-BN sometido a esfuerzos de tensión por compresión diametral. El programa experimental incluyó el ensayo de 54 especímenes cilíndricos de concreto reforzado con dosificaciones de fibras de 30 y 60 kg/m³. Durante 60 días, 18 cilindros fueron sometidos a la acción de un ambiente acuoso, 18 cilindros a la acción de un ambiente salino al 3.5% NaCl (ion cloruro) y 18 cilindros permanecieron en condiciones inalteradas. Para dicho tiempo de exposición, los resultados medidos demostraron que los ambientes corrosivos estudiados, particularmente el medio salino, mejora ligeramente la adherencia entre la matriz de concreto y las fibras de acero, con lo cual se incrementa la capacidad de deformación del concreto reforzado con fibras de acero. Sin embargo, el medio salino ocasiona una pérdida aproximada del 13% y 15% en la resistencia máxima y la tenacidad en tensión por compresión diametral, respectivamente, debido al efecto de degradación proporcionado por el ion cloruro.

Palabras clave: CRFA, dosificación de fibras, ion cloruro, resistencia a tensión por compresión diametral, tenacidad.

SPLITTING TENSILE PERFORMANCE OF RC-65/35-BN STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE SUBJECTED TO THE EFFECT OF CHLORIDE ION

ABSTRACT

The influence of two corrosive environments on the mechanical properties of RC-65/35-BN steel fiber reinforced concrete, SFRC, under splitting tensile stresses is assessed in this paper. The experimental program comprised the tests of 54 cylindrical-type specimens of concrete reinforced with fiber dosages of 30 and 60 kg/m³. During 60 days, 18 cylinders were subjected to the action of a watery environment, 18 cylinders were subjected to an environment of 3.5% NaCl solution (chloride ion) and 18 cylinders were kept in unaltered conditions. For that exposure time, measured results demonstrated that the corrosive environments, specially the environment of 3.5% NaCl solution, slightly improves the bond between concrete matrix and steel fibers, and thus the strain capacity of SFRC increases. However, the 3.5% NaCl solution causes a loss of roughly 13% and 15% on the maximum tensile strength and tensile toughness, respectively, due to the degradation effect provided by the chloride ion.

Keywords: SFRC, fiber dosage, chloride ion, splitting tensile strength, toughness.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, en Colombia y en la mayoría de los países de Latinoamérica, el tema de la vivienda de baja altura ha logrado un gran desarrollo y popularidad

a causa de las políticas implementadas por los gobiernos nacionales, y de la necesidad primordial para la población. La capacidad resistente de este tipo de muros es controlada por la resistencia a esfuerzos de tensión diagonal. Cuando se sustituyen las barras de acero o mallas electrosoldadas

por fibras de acero, no sólo se proporciona refuerzo por cortante a los muros y se podría incrementar la tenacidad de los mismos, sino que también se disminuyen los tiempos de construcción (ACI 544.1R-96). Por tanto, las fibras de acero podrían convertirse en un material constructivo económico y útil en el reforzamiento de muros de concreto para tales viviendas. No obstante, es importante evaluar las condiciones de durabilidad del Concreto Reforzado con Fibras de Acero, CRFA, frente a la acción de entornos húmedos y salinos que favorecen los procesos de corrosión y degradación del refuerzo metálico. Aunque se ha estudiado de forma independiente el comportamiento del CRFA y la corrosión por ion cloruro del concreto reforzado convencionalmente, el efecto de los ambientes corrosivos en las propiedades mecánicas del CRFA es un área de estudio que no ha sido suficientemente examinada.

Por tanto, en este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental para evaluar la influencia de dos ambientes corrosivos, tales como un medio acuoso y un medio salino, y del contenido de fibras en dosificaciones de 30 kg/m³ y 60 kg/m³, sobre el desempeño mecánico del CRFA sometido a esfuerzos de tensión por compresión diametral. Un mejor entendimiento del mecanismo de corrosión propiciará una mejor predicción de las propiedades y la durabilidad del CRFA a largo plazo. Esto permitirá una evaluación racional de tales efectos en el análisis y diseño estructural, y proporcionará un procedimiento efectivo de control o disminución de la corrosión en estructuras con CRFA.

DESEMPEÑO DEL CRFA SOMETIDO A ESFUERZOS DE TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL

Es ampliamente conocido que el concreto exhibe su mayor desempeño cuando soporta esfuerzos de compresión, pero es débil cuando es sometido a esfuerzos de tensión. Existen diversas metodologías para evaluar la resistencia a tensión del concreto de forma directa (tensión pura) o indirecta (estimación aproximada). El procedimiento para medir la resistencia a tensión de forma directa es complejo debido a la fijación de mordazas en el espécimen. Por tanto, la medición de la resistencia a tensión de forma indirecta resulta adecuada para efectos prácticos. En esta investigación se emplea la técnica de tensión por compresión diametral para medir de forma indirecta la resistencia del CRFA sometido a esfuerzos de tensión.

Varios estudios experimentales han estudiado el desempeño del CRFA sometido a esfuerzos de tensión. Por ejemplo, a partir del ensayo de 21 especímenes cilíndricos en CRFA, Denneman *et al.* (2011) observaron que la resistencia

máxima a tensión del CRFA, f_p , se presenta después del primer pico de la curva, f_o , el cual representa el límite elástico y en donde comienza la interacción y aporte de capacidad de las fibras de acero al concreto. Similarmente, Carrillo *et al.* (2014) ensayaron especímenes cilíndricos de CRFA con diferentes dosificaciones de fibras y evaluaron su respuesta a esfuerzos de tensión por compresión diametral. En dicho estudio se describió la curva característica esfuerzo-deformación unitaria transversal de los especímenes de CRFA y se caracterizaron cuatro picos de resistencia en la envolvente (figura 1); es decir, f_o representa la resistencia a tensión por compresión diametral, f_p representa el pico de resistencia asociado al inicio de la contribución de las fibras, f_t representa la resistencia máxima a tensión por compresión diametral, y f_{ut} representa la resistencia última a tensión por compresión diametral.

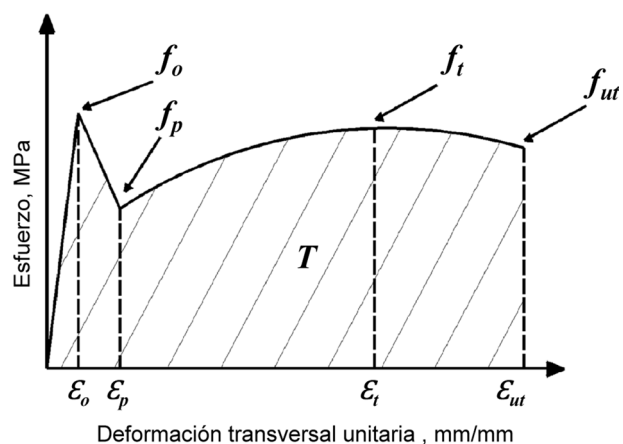


Figura 1. Puntos principales en la curva esfuerzo-deformación en tensión por compresión diametral. Carrillo *et al.* (2014)

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Mezcla de concreto

En este estudio se empleó cemento Portland convencional Tipo I y una adición de ceniza volante con 10% de remplazo del material cementante. Para obtener una mezcla de concreto con resistencia de diseño de 25 MPa a edad de 28 días y un asentamiento de 240 mm (9.5 pulg), la relación agua/cemento (a/c) de la mezcla fue de 0.58. Como material pétreo se empleó agregado fino tipo arena de río y arena de peña con módulos de finura de 3.02 y 1.49, y absorción de 0.77% y 0.79%, respectivamente. Como agregado grueso se utilizó grava fina de tonos grises con Tamaño Máximo Nominal, TMN, de 10 mm. Para garantizar el asentamiento de la mezcla y su manejabilidad, se utilizaron un aditivo súper-plastificante denominado Viscocrete 2100 (SIKA,

2012a) y un aditivo reductor de agua denominado Plastiment AD 20 (SIKA, 2013). Las características y proporciones de la mezcla se resumen en la tabla 1. El concreto empleado para la fundición de los especímenes fue premezclado en planta y proporcionado por la Empresa Argos-Colombia.

Tabla 1. Proporciones de la mezcla de concreto.

<i>Material</i>	<i>Cantidad, kg/m³</i>	<i>Densidad, g/cm³</i>
Cemento	321.3	3.12
Ceniza	35.7	2.09
Arena 1	695.6	2.62
Arena 2	173.9	2.60
Grava	869.5	2.43
Agua	185.0	-

La tasa de adición de las fibras a la mezcla de concreto fue de 1.7 kg/min y el tiempo de mezclado fue de 5 min para las dos dosificaciones. Este procedimiento cumple con las recomendaciones de mezclado para las fibras de acero Dramix; es decir, tasa máxima de adición de fibras de 60 kg/min y tiempo mínimo de mezclado de 5 min (BEKAERT, 2005).

Tipo de fibras de acero

En el estudio se emplearon fibras de acero rectas marca Dramix de referencia RC-65-35-BN, con longitud de 35 mm, diámetro de 0.55 mm, relación de aspecto de aproximadamente 65, con bajo contenido de carbón, y con extremos en forma de gancho. En el estudio se empleó un solo tipo de mezcla de concreto con diferentes dosificaciones de fibras: concreto simple (CS) sin adición de fibras, y CRFA con dosificaciones de 30 kg/m³ y 60 kg/m³, las cuales corresponden a fracciones de volumen, V_f , de 0.38% y 0.76%, respectivamente. La fracción de volumen de fibras es un parámetro que permite expresar la dosificación de fibras en términos adimensionales de fracción o porcentaje, y se obtiene mediante el cociente entre la dosificación de fibras, D_f , y la densidad del acero, γ (7850 kg/m³). Las características y las dosificaciones de las fibras se describen en la tabla 2. El parámetro D_{f-min} representa el porcentaje de la dosificación mínima de fibras que contempla la norma colombiana NSR-10 para remplazar el refuerzo mínimo por cortante en vigas que se dispone usualmente con barras de acero (60 kg/m³).

Tabla 2. Características de las fibras empleadas.

<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>	
Fibra	Tipo	RC-65-35-BN
	Longitud, l_f , mm	35
	Diámetro, d_f , mm	0.55
	Relación de aspecto, l_f/d_f	~ 65
	Resistencia a tensión, MPa	210000
	Módulo de Young, MPa	
Dosificación	% D_{f-min}	50 100
	D_f , kg/m ³	30 60
	Fracción de volumen, V_f , %	0.38 0.76

Tipos de especímenes y proceso de curado

En el estudio se fabricaron 54 especímenes cilíndricos con dimensiones estandarizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Todos los especímenes fueron desmoldados después de 24 horas de su fabricación, e inmediatamente fueron curados mediante la aplicación sobre sus superficies de una película de curado marca Sika de referencia Antisol (SIKA, 2012b). La película empleada es una emulsión acuosa de parafina que garantiza el desarrollo de la resistencia del concreto.

Tipos de ambientes

En el estudio se simulaban dos tipos de ambientes corrosivos. Después que los especímenes desarrollaron su resistencia máxima (edad de 90 días), durante 60 días, 18 especímenes cilíndricos fueron sometidos a la acción de un ambiente acuoso, y 18 cilindros a la acción de un ambiente salino (ion cloruro). Los resultados fueron comparados con aquellos de 18 especímenes cilíndricos en condiciones normales (no alteradas). La notación de los ambientes se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Descripción de los ambientes de exposición.

<i>Abreviación</i>	<i>Significado</i>
A0	Condiciones normales (T = 22 °C)
A1	Ambiente acuoso = Agua dulce (T = 20.6 °C)
A2	Ambiente salino = Solución de Cloruro de Sodio-NaCl al 3.5% (T = 10.5 °C)

MÉTODOS DE ENSAYO

En el estudio se llevaron a cabo ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas del concreto simple (CS) y del concreto reforzado con fibras de acero (CRFA). Estos ensayos se realizaron con el objeto de determinar el efecto de los entornos corrosivos sobre las propiedades mecánicas en tensión por compresión diametral. La matriz de los ensayos mecánicos se muestra en la tabla 4.

Masa unitaria y contenido de aire

La masa unitaria y el contenido de aire del concreto se

calcularon para las diferentes dosificaciones de fibras, según lo dispuesto por la norma NTC 1926-95, la cual es equivalente a la norma ASTM C-138-01. Las muestras de concreto fresco se compactaron por apisonado mediante una varilla en un molde con capacidad de 7 lt, en 3 capas de aproximadamente igual volumen. Luego del vibrado y enrasado, se determinaron, la masa unitaria a partir de la relación entre la masa neta del concreto y el volumen del molde usado, y el contenido de aire del concreto a partir del rendimiento y el volumen total de los ingredientes de la mezcla.

Tabla 4. Descripción y cantidad de ensayos mecánicos.

Tipo de ensayo	Tipo de espécimen	Ambiente A0			Ambiente A1			Ambiente A2			Subtotal	Total especímenes
		D_p , kg/m ³			D_p , kg/m ³			D_p , kg/m ³				
		0	30	60	0	30	60	0	30	60		
Resistencia a compresión, f_c	Cilindro	3	3	3	3	3	3	3	3	3	27	
Resistencia a tensión por compresión diametral, f_t		3	3	3	3	3	3	3	3	3	27	54

Contenido de fibras

El contenido o dosificación real de fibras de cada mezcla de concreto, D_p fue medida siguiendo los lineamientos de la norma EN 14488-7-07. En este caso, se adicionó el volumen de CRFA necesario para llenar un molde cilíndrico de dimensiones estandarizadas. Luego se vació el volumen en otro recipiente y se adicionó suficiente agua para inhabilitar el efecto ligante del cemento. Después del secado de la mezcla sin ligante, las fibras de acero fueron extraídas con la ayuda de imanes. Para cada dosificación se utilizaron tres cilindros de concreto. La dosificación real de fibras se obtuvo a partir del peso resultante de las fibras y el volumen del cilindro.

Resistencia a tensión por compresión diametral

El desempeño a tensión por compresión diametral de los especímenes en forma de cilindros se evaluó siguiendo los lineamientos de la norma NTC 722-00, la cual es equivalente a la norma ASTM C-496-04. La configuración del ensayo se muestra en la figura 2. Para el ensayo se utilizó un sistema automatizado que controla una prensa hidráulica con capacidad 2000 kN, y la velocidad de aplicación de carga fue de 0.061 mm/min. Aunque las normas indicadas no contemplan la medición del desplazamiento, en este estudio se midieron los desplazamientos generados por la aplicación de la carga axial en el plano transversal del

diámetro del cilindro. Estos desplazamientos se midieron por medio de transductores que fueron acoplados al espécimen en cada una de sus caras opuestas (figura 2), en una distancia definida. Los transductores de desplazamiento empleados fueron de tipo CDP-10 con recorrido máximo de 10 mm y precisión de 0.1 mm (TOKYO SOKKI KENKYUJO, 2014). La deformación unitaria de tensión por compresión diametral se calculó como el promedio de los cocientes obtenidos entre el desplazamiento transversal y la distancia entre los dos puntos definidos de medición de tal desplazamiento. Los valores reportados corresponden al promedio de las deformaciones unitarias medidas en las dos caras del espécimen (figura 2). De esta manera fue posible obtener la curva carga-desplazamiento transversal, los valores de tenacidad en tensión por compresión diametral y la curva completa esfuerzo-deformación unitaria transversal para cada espécimen.

Para el análisis de los resultados se utilizaron parámetros estadísticos tales como la media aritmética (\bar{X}) y el coeficiente de variación (CV), los cuales representan el promedio y la dispersión de los valores medidos, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El incremento de la resistencia a tensión del concreto con el aumento de la dosificación de fibras de acero es ampliamente conocido. Según Nanni (1998), la contribución de las fibras

a la resistencia a tensión se debe a su capacidad para actuar como refuerzo y para tomar los esfuerzos de la matriz de concreto cuando ésta falla en cortante por fricción. Nanni (1998) afirma que la contribución de las fibras en tensión depende de la resistencia del material, la rugosidad de la superficie de las fibras, la microestructura ligante y la estructura granular. La optimización de los factores anteriores tiende a asegurar una mejor interacción concreto-fibras, y a ayudar a desarrollar un mecanismo eficiente que resista el fisuramiento hasta la falla.

Sin embargo, los resultados de una revisión de la literatura demostraron que la influencia de los ambientes corrosivos en el desempeño a tensión del CRFA no ha sido completamente determinada hasta ahora (2015). Por tanto, en esta investigación los especímenes cilíndricos de cada tipo de mezcla y en cada ambiente se sometieron a esfuerzos de tensión por compresión diametral, con el fin de obtener la curva característica esfuerzo-deformación unitaria transversal, y así identificar el efecto de los ambientes sobre los picos principales de resistencia, los valores de deformación asociados y la capacidad de absorción de energía o tenacidad de cada espécimen.

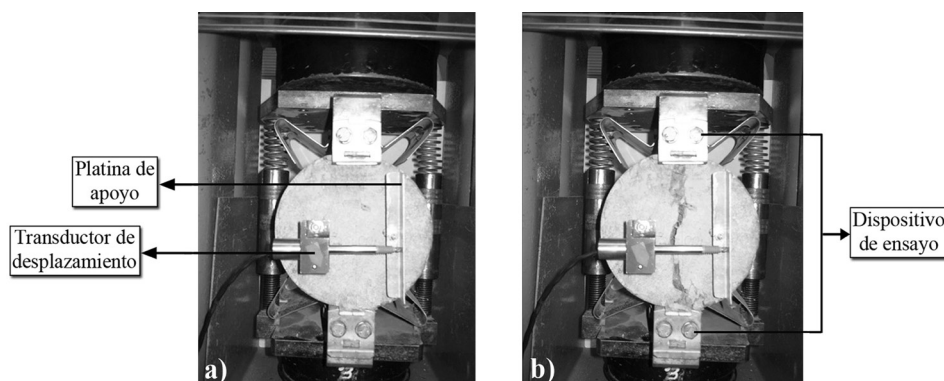


Figura 2. Ensayo de resistencia a tensión por compresión diametral: a) configuración de ensayo, b) falla característica del espécimen

El resumen de los valores obtenidos en los ensayos de masa unitaria y contenido de aire se observan en la tabla 5. Como se observa en la tabla 5, la masa unitaria del concreto con fibras de acero es levemente mayor que la del concreto sin fibras debido al peso adicional que le confieren las fibras al concreto. En general, los valores de masa unitaria obtenidos para concreto simple están dentro del intervalo de 2155 kg/m³ y 2555 kg/m³ indicado en la sección C.2.2 de la NSR-10. Asimismo, como se observa en la tabla 5, el contenido de aire aumenta con el incremento de la dosificación de fibras de acero en el concreto debido al aumento del volumen de poros por la inclusión de las fibras de acero a la mezcla. Los parámetros principales de las curvas esfuerzo-

deformación se describen en la tabla 6 y se esquematizan en la figura 1.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión de los especímenes se muestran en la tabla 7 y son mediciones adaptadas del trabajo efectuado por Carrillo et. al. (2015). De igual forma, los parámetros obtenidos en este estudio se resumen en la tabla 7. Los esfuerzos en tensión por compresión diametral se obtuvieron al identificar los picos característicos de las curvas esfuerzo-deformación, y las deformaciones se obtuvieron al identificar el valor de deformación asociado a cada esfuerzo pico.

Tabla 5. Resultados de masa unitaria y contenido de aire.

Parámetro	D_f , kg/m ³	0	27.5	58.1
Masa unitaria, kg/m ³	Valores medidos	2277	2285	2298
		2272	2279	2304
	X	2281	2290	2298
	CV, %	0.2	0.2	0.11
Contenido de aire, %	Valores medidos	1.27	1.95	2.17
		1.15	2.03	2.18
	X	1.11	1.77	2.03
	CV, %	1.18	1.98	2.13
		5.8	5.7	3.2

Tabla 6. Nomenclatura empleada en el desempeño en tensión por compresión diametral.

Parámetro	Significado
D_f	Dosificación de fibras real medida
V_f	Fracción de volumen de fibras real
f_c	Resistencia a compresión
f_o	Resistencia a tensión por compresión diametral
f_p	Resistencia asociada al inicio de la contribución de las fibras en tensión por compresión diametral
f_t	Resistencia máxima a tensión por compresión diametral
f_{ut}	Resistencia última a tensión por compresión diametral
ε_o	Deformación unitaria asociada a f_o
ε_p	Deformación unitaria asociada a f_p
ε_t	Deformación unitaria asociada a f_t
ε_{ut}	Deformación unitaria asociada a f_{ut}
T_{ten}	Tenacidad en tensión por compresión diametral

Tabla 7. Valores medidos del desempeño en tensión por compresión diametral para cada ambiente y tipo de mezcla.

Parámetro	A0			A1			A2			
D_f , kg/m ³	0	27.5	58.1	0	27.5	58.1	0	27.5	58.1	
V_f , %	0	0.35	0.74	0	0.35	0.74	0	0.35	0.74	
f_c , MPa	X	38.14	36.73	38.73	42.03	43.11	41.02	40.34	42.05	40.92
	CV , %	2.0	1.7	1.7	4.8	1.4	1.6	5.0	0.7	1.4
f_o , MPa	X	2.93	3.08	3.09	3.21	3.17	3.01	3.11	3.03	3.05
	CV , %	6.5	10.8	19.1	7.7	8.0	10.5	5.1	3.4	2.8
f_p , MPa	X	-	3.39	3.31	-	3.13	2.82	-	3.00	2.93
	CV , %	-	11.1	18.7	-	8.1	10.0	-	3.5	1.8
f_t , MPa	X	-	3.63	4.33	-	3.43	4.31	-	3.37	3.74
	CV , %	-	6.1	3.4	-	10.6	4.0	-	0.6	5.6
f_{ut} , MPa	X	-	0.87	2.50	-	1.16	1.53	-	0.85	1.79
	CV , %	-	36.8	20.3	-	30.1	20.4	-	33.7	8.9
ε_o	X	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004
	CV , %	27.8	29.7	4.8	20.0	38.3	25.7	3.1	39.2	16.8
ε_p	X	-	0.0005	0.0004	-	0.0007	0.0004	-	0.0009	0.0008
	CV , %	-	5.5	3.0	-	0.5	3.6	-	1.3	3.0
ε_t	X	-	0.0060	0.0195	-	0.0088	0.0223	-	0.0070	0.0258
	CV , %	-	28.7	15.6	-	35.5	8.3	-	7.7	15.1
ε_{ut}	X	-	0.0320	0.0564	-	0.0313	0.0529	-	0.0276	0.0521
	CV , %	-	7.8	21.9	-	6.6	9.0	-	12.9	9.3
T_{ten} , J	X	3.4	472.9	920.9	5.2	453.9	865.7	5.3	435.1	782.8
	CV , %	23.5	2.3	1.7	7.3	3.0	2.9	8.3	6.7	5.8
f_o/f_c	X	0.47	0.51	0.50	0.5	0.48	0.46	0.49	0.47	0.47
	CV , %	5.6	9.9	20.2	9.6	7.7	10.9	5.9	3.4	2.5
f_p/f_c	X	-	0.56	0.54	-	0.48	0.44	-	0.46	0.46
	CV , %	-	10.3	19.8	-	7.6	10.4	-	3.6	1.4
f_t/f_c	X	-	0.60	0.70	-	0.52	0.67	-	0.52	0.58
	CV , %	-	5.2	3.8	-	10.1	4.3	-	0.8	6.1
f_{ut}/f_c	X	-	0.14	0.41	-	0.18	0.24	-	0.13	0.28
	CV , %	-	27.1	17.8	-	13.3	19.7	-	23.5	9.2
f_t/f_o	X	-	2.07	2.46	-	1.93	2.48	-	1.94	2.14
	CV , %	-	1.1	9.2	-	6.9	1.8	-	2.2	6.9
T_{ten}/f_c	X	0.5	78.0	148.0	0.8	69.1	135.0	0.8	67.1	124.1
	CV , %	23.6	3.1	0.1	9.3	2.7	2.2	7.9	6.8	6.3

A partir de las curvas esfuerzo-deformación medidas en el estudio, en las figuras 3a1 a 3c3 se muestra el efecto de la adición de fibras de acero y de los ambientes de exposición en las propiedades del CRFA en tensión por compresión diametral. Como se indica en la tabla 4, se ensayaron tres especímenes para cada dosificación y para cada ambiente de exposición. Las curvas calculadas con el promedio de las tres curvas de cada ambiente y dosificación se muestran en las figuras 3d1 a 3d3.

A partir de las tendencias de los resultados medidos, en la figura 4 se muestra la relación entre los parámetros de desempeño en tensión por compresión diametral y el

producto entre la fracción de volumen de fibras y relación de aspecto de las fibras, $[V_f(l/d_f)]$. El parámetro de la fracción de volumen de fibras se calculó con base en las dosificaciones reales de fibras medidas, siguiendo los lineamientos de la norma EN 14488-7-07. Los resultados de la dosificación, D_f y la fracción de volumen, V_f reales de fibras se resumen en la tabla 7. Para efectos del análisis de las propiedades mecánicas del CRFA, de aquí en adelante se emplearán los valores reales de contenido de fibras. En la figura 4 también se puede observar el efecto de los ambientes corrosivos sobre las propiedades en tensión por compresión diametral definidas en la figura 1.

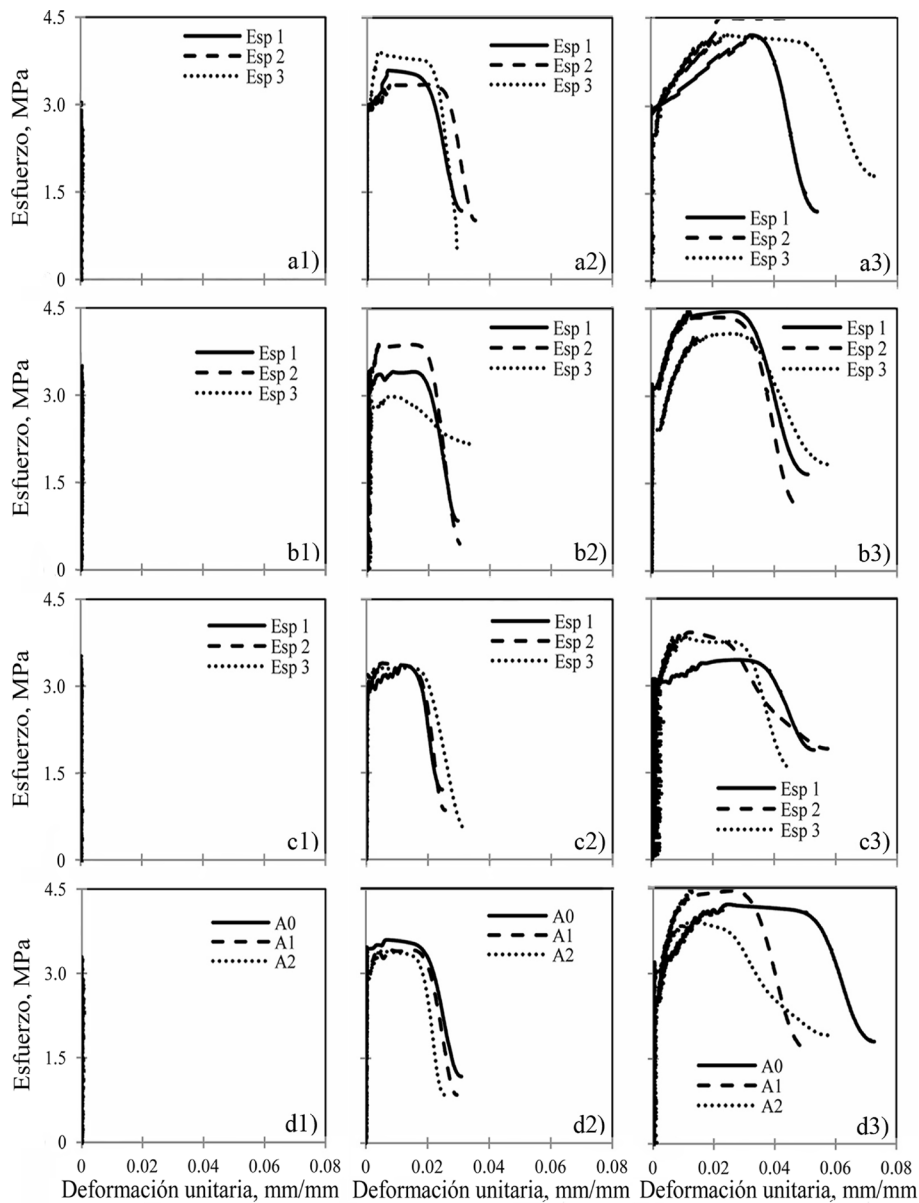


Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación para cada tipo de mezcla en tensión por compresión diametral: a1) A0-0, a2) A0-30, a3) A0-60, b1) A1-0, b2) A1-30, b3) A1-60, c1) A2-0, c2) A2-30, c3) A2-60, d1) $D_f = 0 \text{ kg/m}^3$, d2) 27.5 kg/m^3 , d3) 58.1 kg/m^3 .

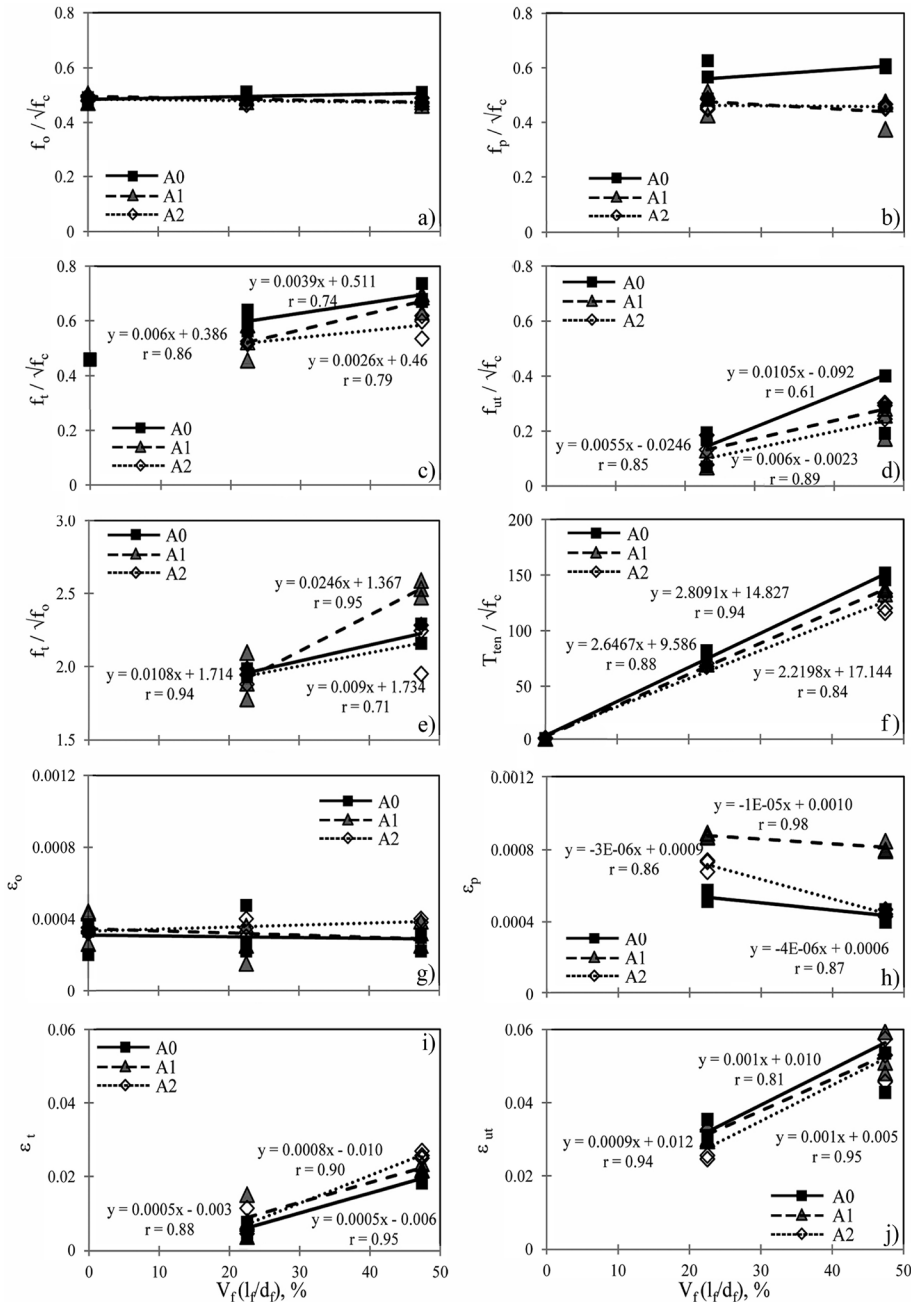


Figura 4. Tendencias de los parámetros en tensión por compresión diametral: a) f_0 , b) f_p , c) f_r , d) f_{ur} , e) f_t / f_0 , f) T_{ten} , g) ϵ_0 , h) ϵ_p , i) ϵ_r , j) ϵ_{ur}

La dispersión de las tendencias fue evaluada mediante el coeficiente de correlación r , definido como un indicador de la intensidad de la relación lineal entre los valores estimados y los datos experimentales. Por tanto, si el valor de r se aproxima a 1, la correlación entre los parámetros analizados será directa y más fuerte. En cuanto al análisis y discusión de los resultados, inicialmente se contempla la discusión del efecto del producto $[V_f(l/d_f)]$, sobre las propiedades mecánicas en tensión por compresión diametral del CRFA en condiciones normales (Ambiente A0). Luego, la discusión se orienta hacia el efecto de los ambientes acuoso

y salino sobre las propiedades mecánicas.

En la figura 4a se observa que para el ambiente de exposición A0, el primer pico de resistencia, f_0 , permanece casi constante con el incremento del producto $[V_f(l/d_f)]$. Esto se debe a que este punto está asociado a la formación de la primera grieta y aún no se ha presentado la contribución de las fibras a la matriz. De igual forma, en la figura 4g se observa que, para todos los ambientes de exposición, la deformación unitaria transversal asociada a la resistencia a tensión por compresión diametral, ϵ_0 , permanece en un valor

casí constante para todas las dosificaciones empleadas. Sin embargo, Carrillo *et al.* (2014) encontraron que el parámetro ε_o disminuye levemente con el producto $[V_f(l/d_p)]$. En la figura 4b se observa que, para el ambiente A0, el pico de resistencia asociado al inicio de la contribución de las fibras, f_p aumenta con el incremento del producto $[V_f(l/d_p)]$, ya que se reduce la degradación de la capacidad de resistencia del concreto después del límite elástico. Carrillo *et al.* (2014) encontraron la misma tendencia y atribuyen este efecto a la contribución de las fibras de acero sobre la disminución de la degradación de la resistencia después de la primera fisura. Sin embargo, como se observa en la figura 4h, el parámetro de deformación ε_p disminuye con el incremento del producto $[V_f(l/d_p)]$ para el ambiente A0. Esta disminución se debe a que, en el inicio de su contribución mecánica de las fibras, se restringe la deformación de la matriz a medida que aumenta el contenido de las fibras.

En las figuras 4c y 4i se observa que la resistencia máxima a tensión por compresión diametral, f_p , y su deformación asociada, ε_t , aumentan con el producto $[V_f(l/d_p)]$, ya que el incremento de la dosificación de fibras aporta mayor capacidad resistente al concreto y mayor capacidad de deformación. En la figura 4c se observa que para el ambiente en condiciones normales A0, la adición de fibras de acero al concreto incrementó hasta 1.5 veces la resistencia máxima a tensión por compresión diametral. Niu *et al.* (2013) demostraron que la adición de fibras al concreto aumenta entre 1.5 a 2 veces la resistencia a tensión por compresión diametral, el cual es similar al incremento observado en la figura 4c. Yazici *et al.* (2007) también evaluaron la influencia de fracción de volumen de fibras, V_p , sobre la resistencia a tensión por compresión diametral del concreto, la cual fue determinada por medio de cubos de concreto de 150 mm de lado. Yazici *et al.* (2007) encontraron que para todas las dosificaciones de fibras, la resistencia a tensión del CRFA aumenta principalmente con el incremento de la relación de aspecto de las fibras, pero también con el aumento de la dosificación. En dicho estudio también se encontró que el uso de las fibras de acero incrementa entre 11% y 54% la resistencia máxima a tensión del concreto con respecto al concreto simple. En la figura 4e se observa que, para el ambiente de exposición A0, f_t aumenta con el producto $[V_f(l/d_p)]$, ya que dicho producto representa la participación de las fibras de acero en la resistencia de la matriz.

Hossain *et al.* (2013) evaluaron la resistencia a tensión por compresión diametral en cilindros de concreto autocompactable reforzado con fibras, con valores de fracción de volumen de fibras variables entre 0 % y 0.3%. El programa experimental incluyó 18 mezclas de concreto con diferentes contenidos de fibras de alcohol polivinilo

(PVA), de acero, e híbridas. Hossain *et al.* encontraron que la respuesta carga-desplazamiento es afectada por el tipo y dosificación de fibras en el concreto. Para fracciones de volumen de 0.3%, las mezclas con fibras híbridas y las mezclas con fibras de acero desarrollaron un segundo pico a una carga más alta antes de la falla; es decir, encontraron que el valor de la resistencia máxima a tensión por compresión diametral, f_p , era mayor que el valor de la resistencia última a tensión por compresión diametral, f_{ur} . Hossain *et al.* también observaron que la deformación asociada al valor de resistencia máxima a tensión por compresión diametral, ε_t , fue mucho mayor que la deformación asociada al valor de resistencia a tensión por compresión diametral, ε_o , lo cual demuestra una ductilidad considerable. Tal como se muestra en la figura 3, en esta investigación, las tendencias de Hossain *et al.* (2013) fueron observadas en mayor medida para las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes de CRFA con dosificación de 58.1 kg/m³, que para las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes de CRFA con dosificación de 27.5 kg/m³.

En las figuras 4d y 4j se observa que la resistencia última a tensión por compresión diametral, f_{ur} , y su valor de deformación asociado, ε_{ur} , aumentan con el incremento del producto $[V_f(l/d_p)]$, ya que a mayor dosificación de fibras se presenta no sólo mayor capacidad resistente del CRFA, sino también mayor capacidad residual de deformación para lograr una falla dúctil en lugar de una falla frágil o súbita. Carrillo *et al.* (2014) afirman que f_{ur} aumenta con el producto $[V_f(l/d_p)]$, debido a que las fibras logran que la tasa de degradación de resistencia disminuya. Sin embargo, Carrillo *et al.* (2014) observaron que el parámetro ε_{ur} disminuye levemente con el producto $[V_f(l/d_p)]$, ya que las fibras logran restringir o mantener la capacidad de deformación máxima de la matriz de concreto.

En la figura 4f se observa que los valores de tenacidad en tensión por compresión diametral aumentan considerablemente con el incremento del producto $[V_f(l/d_p)]$, ya que la energía total absorbida por el espécimen antes del daño total o de la falla es mayor a medida que incrementa la dosificación de fibras. Carrillo *et al.* (2014) reportaron la misma tendencia. Gopalaratnam y Shah (1987) afirman que la tenacidad en tensión del CRFA puede ser una a dos veces mayor en magnitud a los valores de tenacidad del CS, principalmente debido a la gran energía de fricción y a la energía resultante del doblamiento que se desarrolla durante la extracción de las fibras en cualquier lado del espécimen, y, por esto, se generan múltiples fisuras durante la deformación del espécimen. En esta investigación, los valores de tenacidad en tensión por compresión diametral aumentaron aproximadamente dos veces en magnitud y se

presentaron múltiples fisuras durante la deformación del espécimen; es decir, se presentaron efectos similares a los observados por Gopalaratnam y Shah.

Los resultados del estudio de Cengiz y Okan (2009) mostraron que la adición de fibras de acero al concreto de cemento Portland con adición de ceniza volante mejora las propiedades a tensión del concreto. Eren y Marar (2009) evaluaron el efecto del remplazo de contenidos de agregado fino por polvo de caliza triturado, y de la adición de fibras de acero con diferentes dosificaciones y relaciones de aspecto, sobre algunas propiedades del concreto. Eren y Marar (2009) observaron que para una relación de aspecto de 80 y una fracción de volumen de 1.5% de fibras se incrementó la resistencia a tensión por compresión diametral del concreto en el orden de 111% en comparación con el concreto simple (CS).

En cuanto al efecto de los ambientes corrosivos, en la figura 4a se observa que el primer pico de resistencia, f_o , no varía con la acción de los entornos corrosivos debido a que este punto está asociado a la formación de la primera grieta y aún no se ha presentado la contribución de las fibras en la matriz; es decir, el fisuramiento del concreto tiende a ser nulo. Por otro lado, en la figura 4b se observa que el pico de resistencia asociado al inicio de la contribución de las fibras, f_p , se reduce en magnitudes similares para los ambientes A1 y A2, debido a la acción de las soluciones acuosa y salina. No obstante, como se observa en la figura 4h, el parámetro de deformación asociado a este pico, ϵ_p , aumentó en comparación con los valores de los especímenes sometidos al A0. Este incremento se debe al efecto adverso de los ambientes acuoso y salino sobre las fibras de acero en el concreto.

En la figura 4c también se observa que se produce una disminución en los valores de f_t para los especímenes de CRFA sometidos a ambientes corrosivos, especialmente en el ambiente salino (A2), donde se registró una reducción del 14% de f_t por la acción de los cloruros. Niu *et al.* (2013) observaron que la pérdida de peso y la pérdida de resistencia máxima a tensión de los especímenes en solución de NaCl al 3.5% fue mayor que la pérdida observada en los especímenes en agua. Por tanto, Niu *et al.* (2013) concluyeron que el ion cloruro acelera la pérdida de resistencia máxima a tensión por compresión diametral del CRFA.

En la figura 4i se observa que los valores de deformación ϵ_t de los especímenes sometidos a la acción del ambiente salino A2, fueron mayores que los valores de los especímenes sometidos a la acción del ambiente acuoso A1 y a los valores de los especímenes en condiciones

normales A0, respectivamente, para las dosificaciones de 27.5 y 58.1 kg/m³. En general, un medio salino puede aumentar la capacidad de deformación de los especímenes de CRFA, ya que la presencia de iones cloruro en la microestructura provoca la formación de sales no expansivas dentro de los poros y una activación alcalina de la ceniza volante adicionada en la mezcla por el ingreso del ion cloruro y reacciones secundarias relacionadas tales como disoluciones, precipitaciones, intercambios iónicos y aumento del pH de la matriz (Goñi *et al.* 2013). En consecuencia, la microestructura se vuelve menos porosa. Para corto plazo (aproximadamente 60 días), cuando el efecto de la corrosión en las fibras de acero no es aún significativo, el ambiente A1 genera también mayor capacidad de deformación que el ambiente A0, debido a que el agua hidrata la matriz y produce un aumento en el volumen de los poros capilares (Neville, 2011). Sin embargo, este incremento es menor al proporcionado por el ambiente A2, ya que el efecto anteriormente mencionado del ambiente salino en la matriz genera mayor energía de reacción y se produce mejor adherencia entre la matriz y las fibras de acero.

En la figura 4d se observa que los valores de f_u disminuyen por la acción de los ambientes corrosivos. La disminución es mayor en el ambiente A1 que en el ambiente A2, debido a que, para el corto tiempo de exposición de este estudio, los iones cloruro en el ambiente A2 forman sales que activan la ceniza volante y generan mayor energía de reacción y, por tanto, las propiedades mecánicas de la matriz compuesta se mejoran en comparación con los especímenes del ambiente A1. En la figura 4j se observa el mismo efecto de disminución del ambiente acuoso A1 y el ambiente salino A2 en la capacidad de deformación del CRFA, ϵ_{ut} , la cual es menor que la proporcionada en el ambiente en condiciones normales (A0).

Adicionalmente, como se muestra en la figura 4f, en este estudio las mayores modificaciones se registraron en los valores de tenacidad para los especímenes con dosificación de fibras $D_f = 58.1$ kg/m³; por ejemplo, se registraron reducciones de 6% y 15% para el ambiente acuoso y el ambiente salino, respectivamente. Este efecto es más pronunciado en los especímenes sometidos al ambiente salino (A2) que en los sometidos al ambiente acuoso (A1), debido a la severidad de la afectación generada por cada uno de los ambientes corrosivos a las fibras.

Para propósitos prácticos se requieren ecuaciones aproximadas para evaluar el efecto de ambientes corrosivos sobre el desempeño en tensión por compresión diametral del CRFA. A partir de las tendencias de los resultados medidos,

en la tablas 8 y 9 se proponen ecuaciones que definen modelos de predicción de los parámetros de desempeño del CRFA sometido a esfuerzos de tensión por compresión diametral y al efecto de diferentes ambientes de exposición. Con base en los valores de r de las ecuaciones, se puede afirmar que los modelos propuestos resultan adecuados y

confiables, ya que están asociados a una fuerte correlación entre las variables medidas ($r = \sim 1$). Por tanto, se demuestra que las ecuaciones describen adecuadamente el efecto de los entornos corrosivos estudiados en las propiedades de tensión por compresión diametral del CRFA.

Tabla 8. Ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas del CRFA.

Propiedad	Ecuación Propuesta	Unidad
Tensión por compresión diametral	$f_i = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B]\sqrt{f_c}$	MPa
	$f_i = [C(V_f \times (l_f/d_f)) + D]\sqrt{f_o}$	MPa
	$f_{ut} = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B]\sqrt{f_c}$	MPa
	$T_{ten} = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B]\sqrt{f_c}$	Joule
	$\epsilon_p = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B]$	-
	$\epsilon_t = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B]$	-
	$\epsilon_{ut} = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B]$	-

Tabla 9. Constantes de las ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas del CRFA.

Parámetro	Ambiente de exposición	Constante				Coeficiente de correlación
		A	B	C	D	
f_t	A0	0.004	0.511	0.011	1.714	$r = 0.85$
	A1	0.006	0.386	0.025	1.367	$r = 0.87$
	A2	0.003	0.460	0.009	1.734	$r = 0.79$
f_{ut}	A0	0.011	-0.092	-	-	$r = 0.60$
	A1	0.006	-0.025	-	-	$r = 0.85$
	A2	0.006	-0.002	-	-	$r = 0.89$
T_{ten}	A0	2.809	14.827	-	-	$r = 0.94$
	A1	2.647	9.586	-	-	$r = 0.88$
	A2	2.220	17.144	-	-	$r = 0.84$
ϵ_p	A0	-0.000004	0.0006	-	-	$r = 0.87$
	A1	-0.000010	0.0010	-	-	$r = 0.98$
	A2	-0.000003	0.0009	-	-	$r = 0.86$
ϵ_t	A0	0.001	-0.006	-	-	$r = 0.95$
	A1	0.001	-0.003	-	-	$r = 0.65$
	A2	0.001	-0.001	-	-	$r = 0.91$
ϵ_{ut}	A0	0.001	0.010	-	-	$r = 0.81$
	A1	0.001	0.012	-	-	$r = 0.94$
	A2	0.001	0.006	-	-	$r = 0.95$

CONCLUSIONES

En este artículo se evaluó experimentalmente el comportamiento del CRFA sometido a esfuerzos de tensión por compresión diametral y a la acción de entornos corrosivos. Los resultados del estudio permiten concluir lo siguiente:

- El incremento de la resistencia mecánica en tensión del CRFA depende del tipo y dosificación de fibras

utilizada. Para una relación de aspecto de fibras de 65 y dosificaciones de fibra de 27.5 y 58.1 kg/m³ se observó que las fibras de acero confieren al concreto incrementos de la resistencia máxima a la tensión por compresión diametral de hasta 33%, con respecto al concreto simple. Asimismo, la adición de fibras de acero es una forma efectiva de mejorar la ductilidad y la tenacidad del concreto, ya que cuando éstas se encuentran homogéneamente distribuidas, soportan y distribuyen gran parte de los esfuerzos de tensión y

cortante generados en la interface matriz- fibras.

- El efecto de los ambientes corrosivos estudiados sobre los parámetros de tensión por compresión diametral es más notable para los especímenes con dosificación de 58.1 kg/m^3 , debido a la inclusión de un mayor contenido de aire atrapado en el proceso de mezclado de las fibras y a la sustitución del agregado grueso por mayores contenidos de fibras de acero. Es decir, el CRFA con mayor contenido de fibras será más vulnerable a la acción de los ambientes corrosivos.
- Para los especímenes de CRFA sometidos al ambiente salino A2 y dosificación de fibras de 58.1 kg/m^3 , se observaron reducciones de 13% y 15% en los valores de resistencia máxima y tenacidad en tensión por compresión diametral, respectivamente. Lo anterior indica que en presencia de ambientes salinos, el CRFA con mayor dosificación de fibras manifiesta grandes reducciones en resistencia y capacidad de absorción de energía, en comparación con entornos acuosos o húmedos sin la presencia de cloruros. Adicionalmente, para un tiempo de exposición de 60 días se presentó un leve aumento en la deformación de los especímenes expuestos a las condiciones del ambiente salino A2, debido a la formación de sales no expansivas que aumentan la compacidad de la matriz y la hacen menos porosa. Sin embargo para periodos de exposición prolongados se estima deterioro de las fibras de acero y, por tanto, una mayor degradación de las propiedades mecánicas del CRFA.
- A partir de las tendencias de los resultados experimentales, en este estudio se han propuesto ecuaciones que permiten describir el efecto de diferentes ambientes de exposición sobre el CRFA sometido a esfuerzos de tensión por compresión diametral. Las ecuaciones propuestas aplican para concretos de peso normal con masa unitaria entre 2250 kg/m^3 y 2350 kg/m^3 , resistencia a compresión entre 35 MPa a 45 MPa, con fibras de acero con extremos en forma de gancho y con resistencia a tensión de 1345 MPa, y valor del producto $[V_f(l/d_f)]$ que varíe entre 22.5% y 47.4%.

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus más sinceros agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones de la UMNG por el apoyo financiero para desarrollar el proyecto IMP-ING-1574. Adicionalmente, los autores expresan su agradecimiento a las empresas Argos y Proalco (representante de Bekaert en Colombia) por la donación de concreto y las fibras de acero, respectivamente, en especial a los Ingenieros Diego Velandia y Liliana Cardona. De la

misma forma, a los ingenieros Sebastián Varela, Miguel Ospina y Felipe Riveros, y al técnico William Castaño por su apoyo en la realización de las pruebas en los Laboratorios de Agregados y Concretos, y de Térmicas de la Universidad Militar Nueva Granada.

REFERENCIAS

- ACI 544. (1996). State of the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96). American Concrete Institute, Detroit, MI, Tech. Rep. p.66.
- ASTM C-138 (2001). Standard test method for density (unit weight), yield and air content (gravimetric) of concrete. ASTM -C-138. ASTM International, PA, USA, p.4.
- ASTM C-496 (2004). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM C-496. ASTM International, PA, USA, p.4.
- BEKAERT (2005). Product Data Sheet Dramix RC65/35BN, Zvevegem, Belgium.
- CARRILLO, J., BARRERA, A., ACOSTA, D. (2014). Evaluación del desempeño a tensión por compresión diametral del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306. Revista Ingeniería y Competitividad, vol. 16(1), pp. 261-272.
- CARRILLO, J., CÁRDENAS, J., APERADOR, W. (2015). Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN. Revista Ingeniería y Desarrollo, DOI: 10.14482/inde.33.2.7075, Vol. 33, No. 2, pp. 149-171.
- CENGİZ, D., OKAN, K. (2009). Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 392-399. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.002.
- DENNEMAN, E., KEARSLEY, E., VISSER A. (2011). Splitting tensile test for fibre reinforced concrete. Materials and Structures, vol. 44, pp. 1441-1449. DOI: 10.1617/s11527-011-9709-x.
- EN 14488-7 (2007). Ensayos de hormigón proyectado Parte 7 – Contenido de fibras del hormigón reforzado con fibras. EN 14488-7. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, p.8.
- EREN, Ö., MARAR, K. (2009). Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete. Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 981-988. DOI:10.1016/j.

- conbuildmat.2008.05.014.
- GOÑI, S., FRIAS, M., VIGIL DE LA VILLA, R., GARCÍA, R. (2013). Sodium chloride effect on durability of ternary blended cement. *Microstructural characterization and strength. Composites: Part B*, vol. 54, pp. 163–168. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.05.002.
- GOPALARATNAM, V., SHAH, S. (1987). *Failure Mechanisms and Fracture of Fiber Reinforced Concrete. Fiber Reinforced Concrete- properties and Applications*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1-25.
- HOSSAIN, K., LACHEMI, M., SAMMOUR, M., SONEBI, M. (2013). Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres. *Construction and Building Materials*, vol. 45, pp. 20–29. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.054.
- NANNI, A. (1998). Splitting-tension test for fiber reinforced concrete. *ACI Mater J*, vol. 85(4), pp. 229–233.
- NEVILLE, A. (2011). *Properties of Concrete*. (5 ed.). England: Pearson Educational Ltd. p 872.
- NIU, D., JIANG, L., BAI, M., MIAO, Y. (2013). Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition. *Materials and Design*, vol. 44, pp. 267–273. DOI:10.1016/j.matdes.2012.07.074.
- NTC 722 (2000). Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto. NTC-722. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá D.C., p.9.
- NTC 1926 (1995). Método de ensayo para determinar la masa unitaria, rendimiento y contenido de aire por gravimetría del concreto. NTC-1926. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá D.C., p.8.
- NSR-10 (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo-resistente, NSR-10., Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, Colombia, 2010, p.1536.
- SIKA (2012a). Ficha técnica Viscocrete 2100 Bogotá, Colombia.
- SIKA (2012b). Ficha técnica Antisol blanco Bogotá, Colombia.
- SIKA (2013). Ficha técnica Plastiment AD 20, Bogotá, Colombia.
- TOKYO SOKKI KENKYUJO (2014). Product Data Sheet. Displacement transducer CDP-10, Tokyo, Japan.
- YAZICI, S., İNAN, G., TABAK, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1250-1253. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025.