

Flexural mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under corrosive environments

Propiedades mecánicas a flexión del concreto reforzado con fibras de acero bajo ambientes corrosivos

J. Carrillo¹*, J. Cárdenas Pulido*, W. Aperador*

* Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 01/08/2016

Fecha de Aceptación: 22/02/2017

PAG 59-72

Abstract

The influence of two corrosive environments at a short term and the fiber dosage on the flexural performance of steel fiber reinforced concrete, SFRC, is assessed in this paper. The experimental program comprised the tests of 54 SFRC specimens having steel fibers characterized by a length/diameter ratio of 65 and fiber dosages of 30 and 60 kg/m³. Regarding the corrosive environments, cylinders and beams were subjected to the action of a watery environment and to an environment of 3.5% NaCl solution (chloride ion) during a period of 60 days. The results were compared with those of cylinders and beams kept in unaltered conditions. For this exposure time that is equivalent to the corrosion initiation phase, it was observed that chloride ions of 3.5% NaCl solution cause degradation in mechanical performance of SFRC; for instance, loss of flexural strength of roughly 10% and reduction of flexural toughness equal to 11%. However, saline exposure caused an increase of the deflection capacity of SFRC for the initiation phase of corrosion, which can improve its ductility and bond capacity between the matrix and embedded steel fibers. Finally, equations have been proposed to describe the effect of watery and saline environments in the initiation phase of corrosion on CRFA subjected to bending stresses.

Keywords: SFRC, chloride ion, corrosion initiation, flexural tests, deflection, toughness

Resumen

En este artículo se evalúa la influencia de dos ambientes corrosivos a corto plazo, y de la dosificación de fibras sobre el desempeño a flexión del concreto reforzado con fibras de acero, CRFA. El programa experimental comprendió el ensayo de 54 especímenes de concreto reforzado con fibras de acero que tienen relación longitud/diámetro de 65 y dosificaciones de fibras de 30 kg/m³ y 60 kg/m³. En cuanto a los ambientes corrosivos, cilindros y vigas fueron sometidos a la acción de un medio acuoso y un medio de solución NaCl al 3.5%, por un periodo de 60 días. Los resultados fueron comparados con aquellos cilindros y vigas que permanecieron en condiciones inalteradas. Para dicho tiempo de exposición que corresponde a la fase de iniciación de la corrosión, se observó que los iones cloruro presentes en el medio salino (NaCl al 3.5%) ocasionan degradación en el desempeño mecánico del concreto con fibras de acero, por ejemplo, pérdida aproximada del 10% en la resistencia a flexión y disminución del 11% de la tenacidad en flexión. No obstante para la fase de iniciación de la corrosión, la exposición al medio salino provoca un incremento de la capacidad de deflexión del CRFA que puede mejorar su ductilidad y la capacidad de adherencia entre la matriz y las fibras de acero embebidas. Finalmente, se han propuesto ecuaciones que permiten describir el efecto de ambientes acuosos y salinos en la fase de iniciación de la corrosión sobre el CRFA sometido a esfuerzos de flexión.

Palabras clave: CRFA, ion cloruro, iniciación de corrosión, ensayos a flexión, deflexión, tenacidad

1. Introducción

La corrosión es el proceso por el cual se producen reacciones de oxidación y reducción en el acero a causa de su interacción con el entorno. En condiciones normales, el refuerzo embebido en el concreto recibe protección debido a una alta alcalinidad (pH~13) y a los espesores del recubrimiento considerados entre la superficie expuesta y el contacto metálico. Sin embargo, agentes del entorno tales como iones cloruros, sulfatos y gases contaminantes reaccionan con los productos químicos de la matriz y logran destruir dicha protección, lo que genera reducción del valor pH, deterioro del acero y una subsecuente reducción de las propiedades mecánicas del concreto. Como ejemplo de ello, las estructuras construidas en zonas costeras habitualmente se encuentran sometidas a salpicaduras de olas y/o gradientes de humedad-temperatura que provocan la fisuración del concreto y su posterior degradación debido a la formación de productos expansivos. Según Tuutti (1982), la vida de servicio

de una estructura de concreto en términos de corrosión puede ser generalmente dividida en dos fases: iniciación y propagación. La fase de iniciación es considerada como el tiempo requerido por los agentes externos, principalmente iones cloruro, sulfatos y carbonatación, para penetrar dentro del concreto y causar la despasivación del acero. La fase de propagación es caracterizada por la corrosión activa, la cual se caracteriza por la pérdida de área de la sección transversal del refuerzo y la acumulación gradual de productos de corrosión que causan fisuramiento y descascaramiento de la matriz de concreto, lo que genera una reducción en la seguridad estructural. Para el concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) aplican las mismas causas de corrosión del concreto reforzado convencional, principalmente la corrosión inducida por cloruros y la corrosión causada por la reducción en el pH de la matriz de concreto a partir de la carbonatación (ACI 544.5R-2010).

En este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental que evalúa el efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a flexión del CRFA durante la fase de iniciación de la corrosión (corto plazo). De acuerdo

¹ Autor de correspondencia:

Julian Carrillo, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia.
E-mail: wjcarrillo@gmail.com



con el reporte de durabilidad del concreto reforzado con fibras (ACI 544.5R-2010), las propiedades mecánicas de resistencia a la flexión y particularmente la tenacidad en flexión proporcionan ensayos adecuados para la evaluación de la corrosión en el CRFA. Así, el programa experimental del presente estudio incluye el ensayo a flexión de especímenes de concreto reforzado con dos diferentes dosificaciones de fibra de acero, los cuales fueron sometidos a la acción de ambientes corrosivos.

1.1 Corrosión en el CRFA

Ha sido ampliamente reportado que la corrosión de las fibras de acero es mucho menos severa en comparación con la corrosión del refuerzo de barras de acero convencional de estructuras de concreto (Berrocal et al., 2015a; Sadeghi-Pouya et al., 2013). Las fibras de acero pueden reducir el ingreso de agentes agresivos y la degradación del concreto mediante el control de la fisuración a edades tempranas por retracción o gradientes de temperatura y fisuración en operación por cargas externas (Berrocal et al., 2015 b). De acuerdo con Lambrechts (2003), si las fibras de acero se corroen, el volumen relativamente bajo de las fibras es insuficiente para crear esfuerzos de ruptura asociados con la corrosión de barras de refuerzo de mayor diámetro y, por consiguiente, para un concreto bien compactado, la corrosión de las fibras es restringida exclusivamente a la superficie del CRFA. En el caso de la corrosión inducida por cloruros, la despasivación local del acero ocurre cuando los cloruros exceden un cierto límite conocido como contenido crítico o umbral de cloruros, lo que genera el rompimiento localizado de la capa pasiva del refuerzo, el cual es fenómeno denominado corrosión por picadura (Angst et al., 2011; Stansbury y Buchanan, 2000). Sin embargo, el umbral de cloruros, el cual es generalmente aceptado en el intervalo de 0.4-1.0% para estructuras convencionales de concreto reforzado, ha sido encontrado como significativamente mayor para el CRFA, en ordenes de hasta 4.5% por peso del cementante (Raupach et al., 2004). Esta resistencia a la corrosión fortalecida de las fibras de acero embebidas en el concreto es provocada, de acuerdo con los estudios de Angst et al. (2011), a la combinación de (i) una corta longitud de las fibras de acero, la cual impide grandes diferencias de potencial a lo largo de la fibra y limita la formación de distintas regiones de ánodo y cátodo, y (ii) las condiciones de fabricación (flotación de las fibras en la matriz de concreto), que permite la formación de una capa interfacial rica en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ muy delgada y bien definida entre el concreto y el acero, sin la presencia de vacíos en la interface como es común en el refuerzo de barras ordinario.

Aunque el Concreto Reforzado con Fibras de Acero (CRFA) es menos vulnerable a los efectos de la corrosión en comparación al concreto con refuerzo tradicional, sus propiedades son inevitablemente modificadas durante la exposición a entornos agresivos. De acuerdo con Granju y Balouch (2005), los ambientes corrosivos pueden afectar el desempeño a flexión del CRFA si las fibras de acero son corroídas (fibras en estado conductivo), ya que éstos provocan reducciones en el pico máximo de carga, acompañado de un comportamiento post-pico frágil y quebradizo. No obstante, si se presenta autocurado del CRFA durante la exposición marina, se espera que el pico máximo de carga incremente debido a la restauración de las fisuras y discontinuidades al interior de la matriz. De acuerdo con lo

anterior, el conocimiento de los mecanismos de deterioro del concreto causados por la corrosión de fibras de acero es insuficiente, lo que limita la aplicación del CRFA a un enfoque de diseño conservador en elementos estructurales (Solgaard et al., 2010).

A la fecha (2017), no existen suficientes trabajos de investigación que caractericen el desempeño del CRFA bajo la influencia de la corrosión. El comportamiento de las fibras no ha sido completamente entendido, y el diseño con fibras de acero es influenciado más por la experiencia que por conocimiento científico (Frazão et al., 2015). En el capítulo 9.6.3.1 del Reglamento ACI 318-14 se especifica la utilización de fibras de acero como refuerzo por cortante en vigas de concreto. Adicionalmente, en el capítulo 19.3 del ACI 318-14 se especifican los requisitos de durabilidad del concreto con base en categorías y clases de exposición a las que se verá expuesto. Sin embargo, como se menciona en el comentario R9.6.3.1 de este reglamento, no existen datos para el uso de fibras de acero como refuerzo a cortante en elementos de concreto ni ecuaciones de diseño para elementos en flexión expuestos a cloruros provenientes de sales descongelantes, sal, agua salada, agua de mar o salpicaduras de esas fuentes, por lo que debe considerarse protección contra la corrosión cuando se usen fibras de acero como refuerzo a cortante en ambientes corrosivos. En la ausencia de formulaciones para el CRFA sometido a ambientes corrosivos, los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación son utilizados para formular ecuaciones de predicción que describan en la fase de iniciación de la corrosión el desempeño en flexión del CRFA para ese tipo de ambientes. De esta forma, el conocimiento sobre el comportamiento de las fibras de acero y la documentación de parámetros de uso en manuales y reglamentos, aportarán a ingenieros y personal técnico en general valiosas herramientas orientadas a informar acerca del empleo del CRFA en el diseño de construcciones sometidas bajo la acción de ambientes corrosivos.

2. Programa experimental

El programa experimental se planteó con el propósito de evaluar, durante la fase de iniciación de la corrosión, el desempeño en flexión del CRFA bajo la acción de ambientes corrosivos. El programa comprendió el ensayo de 54 especímenes de concreto en forma de cilindros y vigas, reforzados con fibras de acero que tienen relación longitud/diámetro de 65 y con dosificaciones de fibras de 30 kg/m^3 y 60 kg/m^3 .

2.1 Mezcla de concreto

La resistencia nominal a compresión del concreto a 28 días fue de 25 MPa. Las dosificaciones de los materiales por metro cúbico de la mezcla de concreto utilizada en este estudio fueron 321 kg de cemento Portland convencional Tipo I, 35 kg de ceniza volante correspondiente a un reemplazo de 10% del material cementante principal y 185 kg de agua, lo cual equivale a una relación agua/cemento (a/c) de 0.58 y. Como material pétreo se emplearon 870 kg de 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 utilizaron 870 kg de grava fina con tonos grises y Tamaño Máximo Nominal, TMN, de 10 mm. Para garantizar la manejabilidad

de la mezcla se utilizó un aditivo superplastificante (Sika, 2012a) con dosificación por peso de 0.25% del material cementante principal, y un aditivo reductor de agua (Sika, 2013) con dosificación por peso de 0.45% del material cementante principal.

2.2 Tipo de fibras de acero

En el estudio se emplearon fibras de acero rectas con bajo contenido de carbón, longitud de 35 mm, diámetro de 0.55 mm, relación de aspecto de aproximadamente 65 y extremos en forma de gancho. El programa experimental contempló un solo tipo de mezcla con diferentes dosificaciones de fibras: concreto simple (CS) sin adición de fibras, y concreto reforzado con fibras de acero en dosificaciones de 30 kg/m³ y 60 kg/m³, correspondientes a fracciones de volumen de 0.38% y 0.76% con respecto al volumen total del concreto. La selección de las dosificaciones de fibra en este estudio estuvo basada en los lineamientos del capítulo 26.4.2.2 del Código ACI 318-14, en el cual se contempla el uso de la dosificación mínima de fibras de 60 kg/m³ cuando éstas son utilizadas como refuerzo por cortante en elementos de concreto. En el presente estudio, además de la dosificación mínima permitida, fue utilizada una dosificación correspondiente a la mitad de la dosificación mínima (30 kg/m³) con el fin de caracterizar mejor el efecto de diferentes dosificaciones de fibra sobre el desempeño en flexión del CRFA y su degradación por la corrosión. Adicionalmente, las fracciones de volumen de 0.38% y 0.76% utilizadas en este estudio se encuentran dentro del intervalo típico utilizado para la fabricación de elementos con CRFA en obra, esto es, fracciones de 0.25% a 1.5% por volumen de concreto (ACI 544.1R-96). La tasa de adición de las fibras a la mezcla de concreto fue de 1.7 kg/min y el tiempo de mezclado en estado fresco fue de 5 minutos para las dos dosificaciones empleadas. La tasa y el tiempo de mezclado cumplen con las recomendaciones de mezclado para las fibras de acero; es decir, tasa máxima de adición de fibras de 60 kg/min y tiempo mínimo de mezclado de 5 minutos (Bekaert, 2005).

2.3 Tipos de especímenes y proceso de curado

En el estudio se fabricaron 54 especímenes distribuidos de la siguiente manera: 27 cilindros con dimensiones estandarizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, y 27 especímenes en forma de vigas con sección transversal cuadrada de 150 mm de lado y 600 mm de longitud. Todos los especímenes fueron desmoldados después de 24 horas de su fabricación, e inmediatamente fueron curados mediante la aplicación sobre sus superficies de una membrana de curado (Sika, 2012b). La membrana

empleada consiste en una emulsión acuosa de parafina que garantiza el desarrollo de la resistencia del concreto.

2.4 Tipos de ambientes

En el estudio se simularon dos tipos de ambientes corrosivos. De esta manera, 9 especímenes cilíndricos y 9 vigas fueron sometidas a la acción de un ambiente acuoso, y 9 cilindros y 9 vigas a la acción de un ambiente salino. La notación de los ambientes se presenta en la Tabla 1. Los resultados fueron comparados con aquellos de 9 especímenes cilíndricos y 9 vigas en condiciones normales (no alteradas).

Después que los especímenes experimentaran una estabilización en el desarrollo de su resistencia máxima (edad cercana a los 90 días), éstos fueron sometidos al ambiente A1 o A2. Los especímenes permanecieron inmersos en dichos ambientes por un periodo de 60 días, correspondiente a la fase de iniciación de la corrosión donde es generado el ingreso inicial de los agentes externos (cloruros, sulfatos, carbonatación) para penetrar dentro del concreto y causar la despasivación del acero (Tutti, 1982). Para confirmar el estado inicial o fase de iniciación de la corrosión en el cual los especímenes de CRFA fueron ensayados, el presente estudio puede referirse a los resultados del trabajo efectuado por Aperador et al. (2017), quienes evaluaron los potenciales de corrosión paralelamente sobre los mismos especímenes de CRFA luego de 60 días de exposición a los ambientes acuoso y salino, para las dosificaciones de 30 kg/m³ y 60 kg/m³. De acuerdo con los resultados de Aperador et al. (2017), se encontró que los especímenes de CRFA evaluados en el presente estudio con dosificaciones de fibra de 30 kg/m³ y 60 kg/m³ permanecen en estado pasivo al término de su exposición. De esta manera, se afirma que los especímenes de CRFA en el presente estudio experimentan la fase de iniciación de la corrosión luego de su exposición por 60 días a los ambientes corrosivos estudiados, conforme al criterio de pasivación establecido por Tuutti (1982). Finalmente, los especímenes fueron extraídos de su inmersión y almacenados bajo condiciones de humedad y temperatura ambiente para posteriormente ser ensayados mecánicamente.

2.5 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 efectuaron con el propósito de evaluar el efecto de los ambientes corrosivos sobre el desempeño a flexión del CRFA. La descripción de los ensayos mecánicos realizados en este estudio se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Descripción de los ambientes de exposición

Nomenclatura	Significado
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)



Tabla 2. Descripción y cantidad de ensayos mecánicos

Tipo de ensayo	Tipo de espécimen	Ambiente A0			Ambiente A1			Ambiente A2			Subtotal	Total especímenes
		D_f , kg/m ³			D_f , kg/m ³			D_f , 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	54
Desempeño a flexión, f_r	Viga	3	3	3	3	3	3	3	3	3	27	

2.5.1 Contenido de fibras

El contenido o dosificación real de fibras de acero en cada mezcla de concreto, D_f , fue medida siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN 14488-7 (2007). El cálculo de la dosificación real y la correspondiente fracción de volumen de fibras por metro cúbico de mezcla se obtuvo a partir del peso resultante de las fibras y el volumen del molde utilizado.

2.5.2 Resistencia en flexión

Los especímenes en forma de vigas fueron ensayados a flexión siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C 78 (2015) para CS, y los lineamientos de la norma ASTM C 1609 (2012) para CRFA. Con base en lo estipulado por la norma ASTM C 78 (2015), la velocidad de aplicación de carga fue de 130 N/s para CS, y fue constante a lo largo de todo el ensayo. Para CRFA, el valor medio de la velocidad del ensayo se establece en términos de desplazamiento y fue igual a 0.05 mm/min, lo cual cumple con los intervalos de velocidades propuestos por

la norma ASTM C 1609 (2012); es decir, 0.035 mm/min a 0.10 mm/min para deflexiones en el centro de la luz menores a 1/900 de la luz; y 0.05 mm/min a 0.30 mm/min para deflexiones mayores. El ensayo consistió en la aplicación de dos cargas puntuales continuas y sin impactos a través de un cabezote de dos rodillos localizados sobre el tercio central o tercio medio del espécimen, tal como se muestra en la Figura 1. A cada lado del espécimen tipo viga se acoplaron dos transductores de desplazamiento. El promedio de las dos mediciones permitió calcular la deflexión generada por la aplicación de las cargas y posteriormente la curva esfuerzo-deflexión de 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. Asimismo se empleó el coeficiente de correlación (r) que permitió cuantificar del grado de correspondencia entre las variables analizadas.

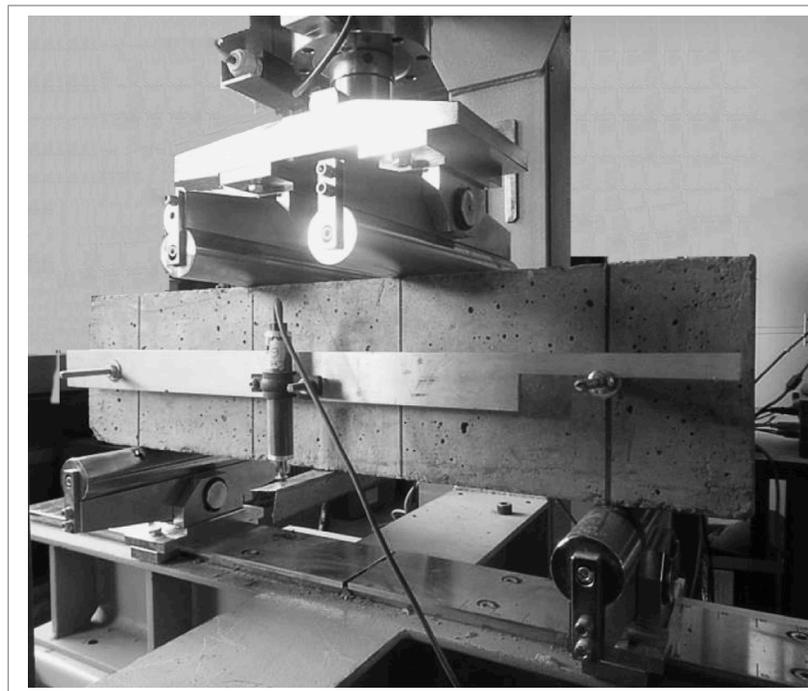


Figura 1. Configuración del ensayo de flexión

3. Resultados y discusión

A partir de los resultados medidos en el ensayo de flexión se calcularon las curvas esfuerzo-deflexión de los especímenes en CRFA y se evaluó el efecto a corto plazo (fase de iniciación) de los ambientes corrosivos sobre los parámetros de tenacidad por flexión, resistencias pico y deflexiones asociadas a estas resistencias. Con base en los lineamientos de la norma ASTM C 1609 (2012), en este estudio se estimó la relación de resistencia equivalente a flexión ($R_{D,150}^T$), definida como el nivel de resistencia remanente promedio después de la formación de la primera fisura y hasta el valor de deflexión $\ell/150$; es decir, valores de 100% indican un comportamiento perfectamente plástico, y valores menores indican menor desempeño.

Similarmente, con base en los criterios de la norma ASTM C 1399 (2010), en este estudio también se calculó el promedio de resistencia residual (ARS) del CRFA luego de la

formación de la primera fisura. Según Johnston y Gray (1986), los factores residuales reflejan el efecto de endurecimiento que proporcionan las fibras y el efecto de fortalecimiento que se puede conseguir en el concreto; por ejemplo, el incremento de la resistencia después de la primera fisura. Estos factores dependen principalmente del tipo, dosificación de fibras y relación de aspecto de las fibras, y son esencialmente independientes de si la matriz es mortero o concreto.

La nomenclatura de los parámetros evaluados en este estudio se presenta en la Tabla 3. Para cada una de las dosificaciones reales de fibras, los resultados se presentan en la Tabla 4. Para efectos del análisis, de aquí en adelante se emplearán los valores reales de dosificación de fibras. Los resultados de los ensayos de masa unitaria, M , y resistencia a compresión, f_c , de los especímenes fueron reportados por Carrillo *et al.* (2015) y se incluyen en la Tabla 4.

Tabla 3. Nomenclatura empleada de las propiedades mecánicas estudiadas

Abreviación	Significado
D_f	Dosificación de fibras real (medida)
V_f	Fracción de volumen de fibras real
ℓ	Distancia de la luz entre apoyos
M	Masa unitaria
f_c	Resistencia a compresión
f_r	Módulo de ruptura
f_{max}	Resistencia máxima a flexión
$f_{\ell/600}$	Resistencia a flexión correspondiente a la deflexión $\ell/600$
$f_{\ell/150}$	Resistencia a flexión correspondiente a la deflexión $\ell/150$
T_{flex}	Tenacidad a flexión
δ_r	Deflexión asociada al módulo de ruptura
δ_{max}	Deflexión asociada a la resistencia máxima a flexión
$R_{D,150}^T$	Relación de resistencia equivalente a flexión
ARS	Promedio de resistencia residual



Tabla 4. Valores medidos en flexión para cada tipo de mezcla

Parámetro		A0			A1			A2		
$D_f, \text{kg/m}^3$		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
$M, \text{kg/m}^3$	X	2277	2285	2298	2277	2285	2298	2277	2285	2298
	CV, %	0.2	0.2	0.11	0.2	0.2	0.11	0.2	0.2	0.11
f_c, MPa	X	38.1	36.7	38.7	42.0	43.1	41.0	40.3	42.1	40.9
	CV, %	2.0	1.7	1.7	4.8	1.4	1.6	5.0	0.7	1.4
f_r, MPa	X	4.03	-	-	4.12	-	-	4.19	-	-
	CV, %	1.2	-	-	6.1	-	-	8.7	-	-
δ_r, mm	X	0.0529	-	-	0.0655	-	-	0.0762	-	-
	CV, %	1.3	-	-	10.8	-	-	3.6	-	-
f_{max}, MPa	X	-	4.50	4.96	-	4.49	4.78	-	4.30	4.49
	CV, %	-	1.3	1.4	-	8.6	13.6	-	6.8	7.9
δ_{max}, mm	X	-	0.0728	0.0746	-	0.0751	0.0768	-	0.0767	0.0801
	CV, %	-	3.0	4.7	-	15.0	0.3	-	7.4	8.9
$f_{\ell/600}, \text{MPa}$	X	-	3.58	4.44	-	3.78	4.28	-	3.57	3.92
	CV, %	-	1.1	1.1	-	5.6	15.0	-	7.5	6.9
$f_{\ell/150}, \text{MPa}$	X	-	1.91	3.16	-	2.09	2.86	-	1.87	2.48
	CV, %	-	0.5	0.3	-	1.1	3.4	-	2.1	1.3
T_{flex}, J	X	0.81	60.54	90.78	1.48	57.99	87.52	1.88	54.96	80.48
	CV, %	4.4	2.0	1.5	12.3	7.9	11.9	12.9	5.4	3.9
$f_r / \sqrt{f_c}$	X	0.66	-	-	0.63	-	-	0.66	-	-
	CV, %	1.8	-	-	4.5	-	-	9.7	-	-
$f_{max} / \sqrt{f_c}$	X	-	0.74	0.80	-	0.68	0.74	-	0.66	0.70
	CV, %	-	2.2	1.9	-	8.5	13.0	-	6.5	7.5
$f_{\ell/600} / \sqrt{f_c}$	X	-	0.59	0.72	-	0.58	0.67	-	0.55	0.61
	CV, %	-	1.5	1.1	-	6.0	14.5	-	7.2	6.3
$f_{\ell/150} / \sqrt{f_c}$	X	-	0.31	0.51	-	0.32	0.45	-	0.29	0.39
	CV, %	-	10.0	0.6	-	17.5	11.5	-	2.8	2.4
$T_{flex} / \sqrt{f_c}$	X	0.1	10.0	14.6	0.2	8.8	13.7	0.3	8.5	12.6
	CV, %	4.5	1.2	2.1	11.7	8.4	11.7	14.3	5.1	4.6
$R^2_{D.150}, \%$	X	-	59.8	81.3	-	57.4	81.4	-	56.8	79.7
	CV, %	-	4.5	3.0	-	1.9	5.0	-	10.2	11.1
ARS, MPa	X	-	3.50	4.34	-	3.40	3.97	-	3.30	3.75
	CV, %	-	5.1	8.0	-	4.2	6.5	-	4.0	15.0

A partir de las curvas esfuerzo-deflexión medidas en el estudio, en las Figuras 2a1 a 2c3 se muestra el efecto de la adición de fibras de acero y de los ambientes de exposición en las propiedades mecánicas a flexión del CRFA. Las curvas calculadas con el promedio de las tres curvas de cada ambiente y dosificación se muestran en las Figuras 2d1 a 2d3. Con base en las tendencias de los resultados medidos, en la Figura 3 se muestra la relación entre los parámetros de

desempeño en flexión y el producto entre la fracción de volumen y relación de aspecto de las fibras, $[V_f(l_f/d_f)]$.

Para establecer la relevancia de la dosificación de fibras y del tipo ambiente sobre los resultados en flexión, fue llevado a cabo el análisis de varianza ANOVA unifactorial y multifactorial sobre cada uno de los parámetros evaluados. Los resultados del análisis ANOVA se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores medidos en flexión para cada tipo de mezcla

Parámetro		ANOVA Unifactorial	ANOVA Multifactorial		
		$D_f=0 \text{ kg/m}^3$	Ambiente	Dosificación fibras	Interacción Ambiente-Dosificación fibras
f_c , MPa	Coefficiente de varianza	-	25.49	1.69	2.65
	Valor P asociado		0.0000	0.2118	0.0669
f_r , MPa	Coefficiente de varianza	30.80	-		
	Valor P asociado	0.0007			
	Prueba de Bartlett	0.693			
δ_r , mm	Coefficiente de varianza	13.96	-		
	Valor P asociado	0.0055			
	Prueba de Bartlett	0.047			
f_{max} , MPa	Coefficiente de varianza	-	2.13	2.90	0.73
	Valor P asociado		0.1610	0.1145	0.5040
δ_{max} , mm	Coefficiente de varianza	-	1.24	0.04	0.13
	Valor P asociado		0.3238	0.8404	0.8803
$f_{\ell/600}$, MPa	Coefficiente de varianza	-	0.49	12.53	1.92
	Valor P asociado		0.6215	0.0041	0.1887
$f_{\ell/150}$, MPa	Coefficiente de varianza	-	0.06	34.72	0.89
	Valor P asociado		0.9462	0.0001	0.4365
T_{flex} , J	Coefficiente de varianza	-	0.20	68.17	7.20
	Valor P asociado		0.8212	0.0000	0.0012
f_r/f_c	Coefficiente de varianza	1.32	-		
	Valor P asociado	0.3359			
	Prueba de Bartlett	0.318			
f_{max}/f_c	Coefficiente de varianza	-	4.43	2.61	0.12
	Valor P asociado		0.0363	0.1321	0.8907
$f_{\ell/600}/f_c$	Coefficiente de varianza	-	2.15	8.77	0.11
	Valor P asociado		0.1595	0.0119	0.8992
$f_{\ell/150}/f_c$	Coefficiente de varianza	-	4.55	67.64	0.59
	Valor P asociado		0.0339	0.0000	0.5709
T_{flex}/f_c	Coefficiente de varianza	-	0.89	46.41	1.98
	Valor P asociado		0.4276	0.0000	0.1411

En cuanto al efecto de la dosificación de fibras y el tipo de ambiente, en la Tabla 5 se observa que la variabilidad de la resistencia máxima en flexión, f_{max} , no presenta una diferencia significativa, al igual que el comportamiento de la deflexión máxima, δ_{max} del CRFA. En la Tabla 5 también se observa que, con base en el análisis de varianzas de flexión para los valores de deflexión $\ell/600$ y $\ell/150$, $f_{\ell/600} - f_{\ell/150}$, la dosificación de fibras demuestra tener una influencia significativamente diferente al agregar fibras de acero a los especímenes de concreto, contrario al efecto producido por el tipo de ambiente. Similarmente, en la Tabla 5 se observa

que los valores de tenacidad en flexión, T_{flex} , varían significativamente con el incremento de fibras de acero, lo cual está asociado al hecho de que la interacción entre la dosificación de fibras y el cambio de ambiente del producto es igualmente significativa en cada asociación; esto demuestra que, en este caso, el efecto de los ambientes es dependiente del efecto de la dosificación de fibras. En cuanto a los valores de resistencia en flexión asociados a una deflexión $\ell/600$, $f_{\ell/600}$ y $\ell/150$, $f_{\ell/150}$, la dosificación de fibras influencia la variabilidad de estas resistencias.



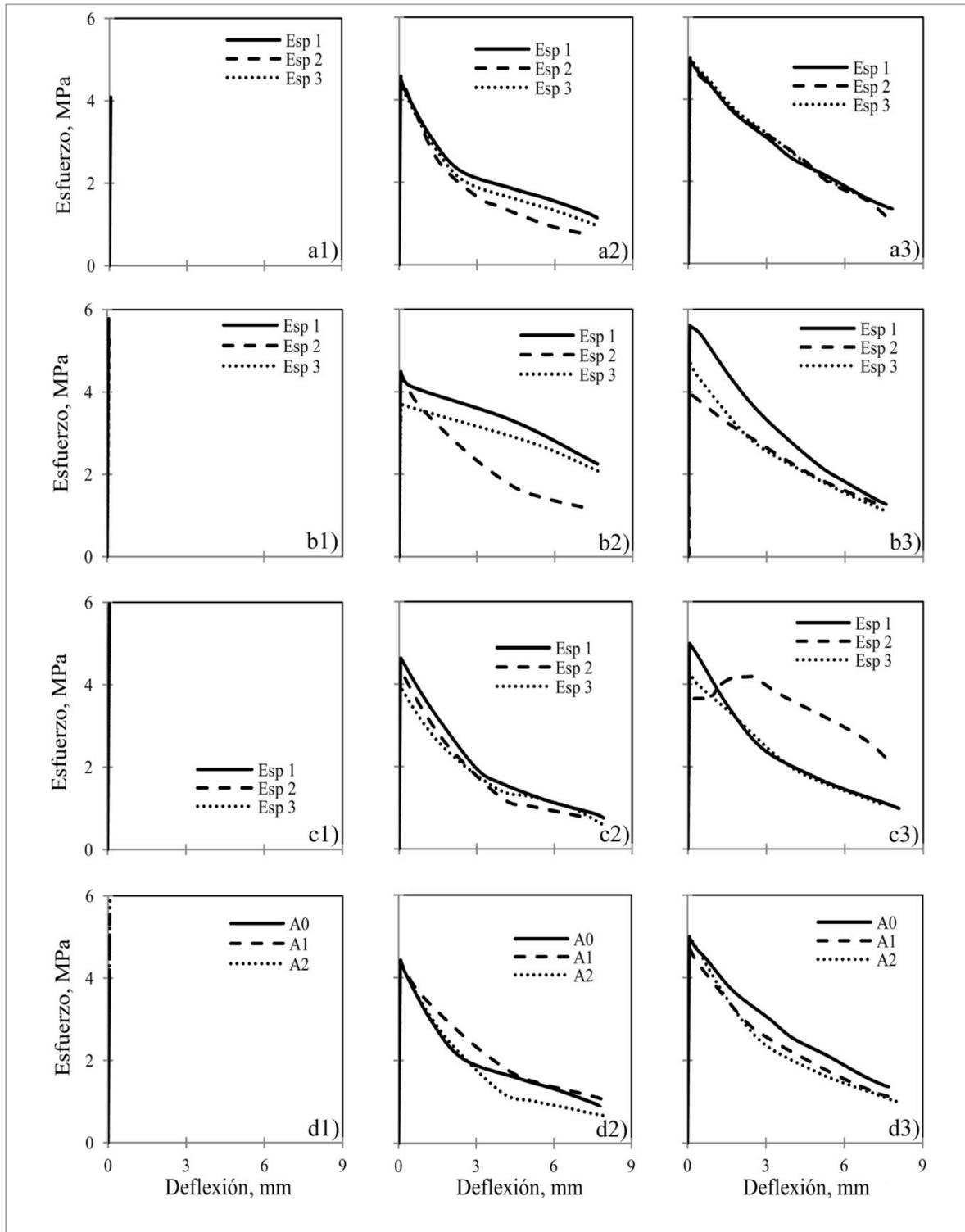


Figura 2. Curvas esfuerzo-deflexión para cada tipo de mezcla en flexión: a1) A0-0, a2) A0-27.5, a3) A0-58.1, b1) A1-27.5, b2) A1-58.1, b3) A1-27.5, c1) A2-58.1, c2) A2-27.5, c3) A2-58.1, d1) $D_f = 0 \text{ kg/m}^3$, d2) $D_f = 27.5 \text{ kg/m}^3$, d3) $D_f = 58.1 \text{ kg/m}^3$

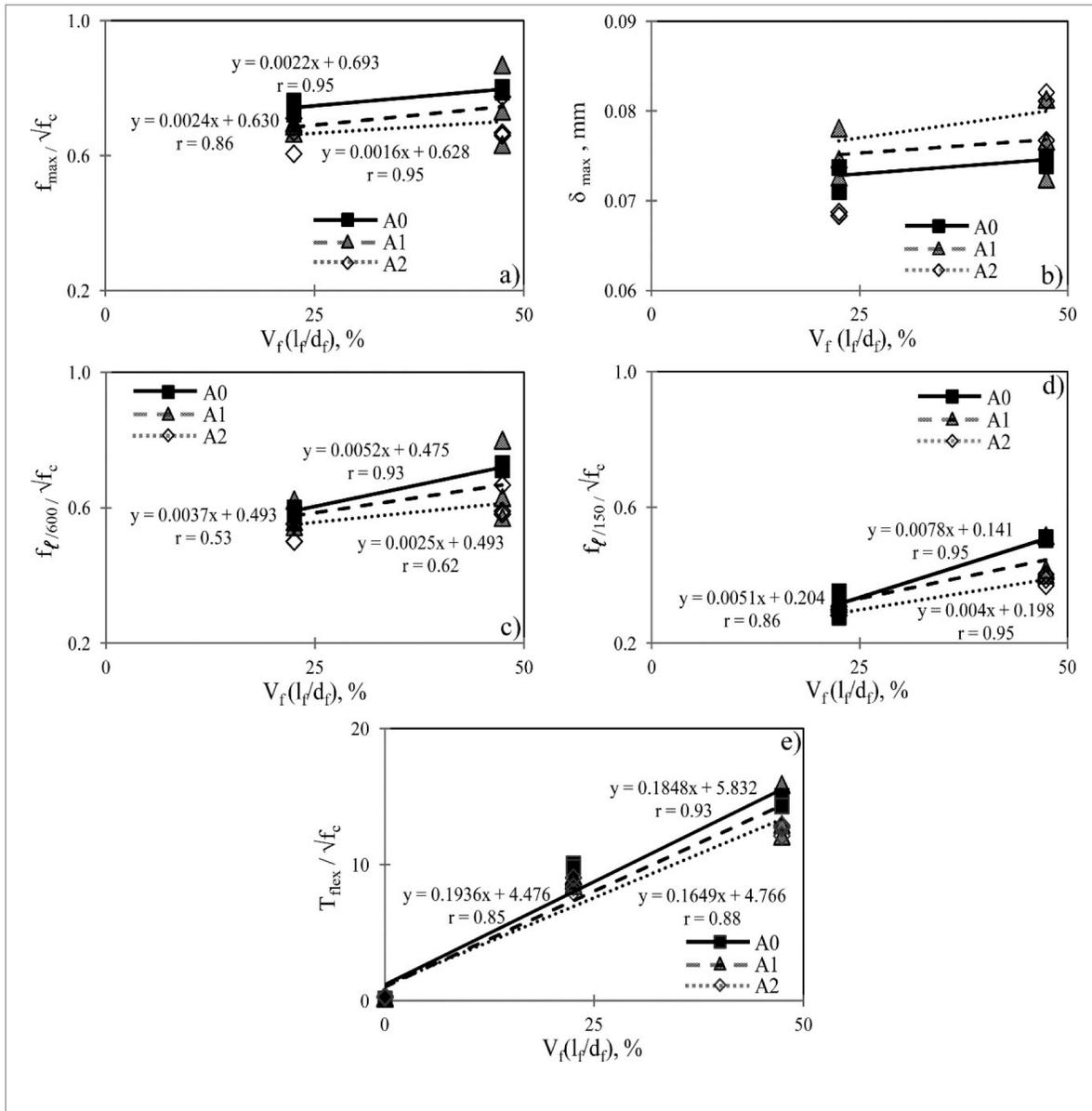


Figura 3. Tendencias obtenidas en flexión: a) f_{max} , b) δ_{max} , c) $f_{\ell/600}$, d) $f_{\ell/150}$, e) T_{flex} .

En cuanto al efecto de la dosificación de fibras, en la Figura 3a se observa que la resistencia máxima en flexión, f_{max} , incrementó con el aumento en la dosificación de fibras de los especímenes en el ambiente en condiciones normales A0. Para este ambiente A0, los valores de f_{max} presentaron un incremento de hasta 19% en comparación con el concreto sin adición de fibras. El incremento de f_{max} que se evidencia en este estudio coincide con los resultados presentados por Yazici *et al.* (2007), quienes evaluaron la influencia de la fracción de volumen de fibras, V_p sobre la resistencia a flexión del concreto y encontraron que el uso de las fibras de acero incrementó la resistencia máxima a flexión del concreto en un intervalo que varió entre 3% y 81% con respecto al concreto simple. De esta manera, por la adición de un mayor volumen de fibras en el concreto, se observó una modificación en el modo de falla en tensión por flexión del CRFA, de un modo súbito y frágil a un modo dúctil.

En la Figura 3b se presenta el comportamiento de la deflexión máxima, δ_{max} del CRFA. Para el ambiente en condiciones normales A0, en la Figura 3b se observa un incremento en la deflexión con el aumento del producto $[V_f(l_f/d_f)]$, lo cual refleja el efecto de fortalecimiento que confieren las fibras de acero a la matriz de concreto.

En las Figuras 3c y 3d se observa que, para el ambiente en condiciones normales A0, la resistencia residual en flexión para los valores de deflexión $\ell/600$ y $\ell/150$, $f_{\ell/600}$ - $f_{\ell/150}$, aumentan con el incremento de la dosificación de fibras de los especímenes. Similarmente, en la Figura 3e se observa que los valores de tenacidad en flexión, T_{flex} aumentan con el incremento del producto $[V_f(l_f/d_f)]$ en el ambiente en condiciones normales A0. Estas tendencias demuestran un incremento en la resistencia y en la capacidad de absorción de energía del CRFA por la inclusión de mayores contenidos de fibras de acero.



En cuanto al efecto de los ambientes corrosivos durante la fase de iniciación de la corrosión, en la Figura 3a se observa una reducción de los valores de f_{max} del CRFA en el ambiente acuoso A1 de 2% y 4% para las dosificaciones 27.5 kg/m³ y 58.1 kg/m³, respectivamente. Los resultados de reducción de resistencia a flexión del CRFA en el ambiente acuoso coinciden con los resultados reportados por Anandan *et al.* (2014), quienes encontraron que la exposición a ciclos alternos de humedecimiento en agua normal y secado no generan una reducción considerable en la resistencia a la flexión del concreto con fibras de acero pero sí una reducción de resistencia a flexión en comparación con los especímenes de referencia sin exposición a agentes agresivos. En la Figura 3a para el ambiente salino A2 se observa que se generaron reducciones de 5% y 10% para el CRFA con dosificaciones 27.5 kg/m³ y 58.1 kg/m³, respectivamente. Lo anterior indica que, con respecto al ambiente en condiciones normales A0, la disminución de la resistencia máxima en flexión es mayor para el ambiente salino A2 que para el ambiente acuoso A1. De esta manera se evidencia que la severidad de ataque de los iones cloruro al CRFA, particularmente hacia las fibras de acero, es mayor en el medio salino A2.

En la Figura 3b se observa que para el ambiente salino A2, la deflexión asociada a la resistencia máxima en flexión, δ_{max} , es mayor a la registrada por los especímenes de los ambientes A0 y A1. Por ejemplo, en comparación con la capacidad de deflexión del concreto simple, fueron evidenciados incrementos de 3% y 5% para la dosificación 27.5 kg/m³ en los ambientes A1 y A2, y de 3% y 7% para la dosificación 58.1 kg/m³ en los ambientes A1 y A2 respectivamente. La mayor capacidad de deformación proporcionada por la dosificación $D_f = 58.1$ kg/m³ se debe, en parte, a la mayor restricción que confieren las fibras de acero para la difusión de las fisuras provocadas por los ambientes acuoso y salino en el CRFA. Por otro lado, como se muestra en las Figuras 2 y 3, para el ambiente salino A2 se presenta el mayor aumento en la capacidad de deformación provocada por los iones cloruro, debido a la formación de cristales de sal que incrementan la fricción entre la matriz y las fibras (Sadeghi-Pouya *et al.*, 2013; Hashimoto *et al.*, 2014; Kwan *et al.*, 2014; Alizade *et al.*, 2016). De acuerdo con Frazão *et al.* (2015), el ambiente salino incrementa la rugosidad superficial de las fibras en el CRFA por causa de los productos de corrosión que mejoran la adherencia interfacial entre las fibras y la matriz cementante y su resistencia a la extracción. Asimismo, Bathia y Foy (1989) afirman que este efecto se debe a la menor acumulación de productos de corrosión sobre la superficie de las fibras metálicas, lo cual genera fuerzas de confinamiento entre la matriz y las fibras. Dicho efecto de fortalecimiento de la matriz por exposición a ambientes salinos ha sido reportado por Ramli *et al.* (2013), quienes atribuyen en hecho no solamente a efectos de acuñamiento que se generan entre la matriz y las fibras, sino también a efectos asociados a la cristalización de la sal dentro de las porosidades. Estos efectos pueden contribuir a sellar las microfisuras en la matriz cementante; este efecto de autocurado e también fue reportado en el estudio de Nordström (2005). Adicionalmente, Carrillo *et al.* (2015) afirman que este efecto de fortalecimiento se debe a la formación de sales no expansivas que aumentan la compacidad de la matriz cementante y la hacen menos porosa.

Kosa y Naaman (1990) evaluaron el efecto de la corrosión sobre las propiedades en flexión del concreto con fibras de acero. En el estudio se saturaron especímenes de CRFA en solución NaCl al 3.5 % para diferentes periodos de exposición. Durante los primeros 60 días de exposición en el medio salino, los especímenes mostraron incrementos en el esfuerzo pico y la tenacidad a flexión, en comparación con los especímenes de control curados en cuarto de aire con temperatura ambiente. Kosa y Naaman (1990) afirman que estos incrementos se generaron por el temprano efecto de la corrosión que pudo haber mejorado a corto plazo la resistencia a la adherencia de la interface entre la matriz y las fibras. Por su parte, Alizade *et al.* (2016) sostienen que las propiedades mecánicas del CRFA son generalmente mejoradas en edades tempranas, lo cual resulta de la expansión de las fibras de acero que proporciona su mejor anclaje a la matriz cementante por causa de los procesos de corrosión. Otras investigaciones (Anandan *et al.*, 2014) reportaron, a edad de 180 días de exposición salina, un efectivo desarrollo de la adherencia entre la interface matriz cementante-fibras, lo cual proporciona una resistencia fortalecida a la extracción de las fibras y, en consecuencia, una capacidad de carga en flexión incrementada. El presente estudio evalúa exclusivamente el efecto de los ambientes acuoso y salino sobre las propiedades en flexión del CRFA a corto plazo (60 días), periodo correspondiente a la fase de iniciación de la corrosión donde las fisuras generadas en el concreto por los procesos de corrosión no han sido formadas, pero fueron asimismo evidenciados incrementos mecánicos, en particular sobre la capacidad de deflexión del CRFA. En contraste, Kosa y Naaman (1990) observaron que, luego de 300 días de exposición al medio salino, se presentaron reducciones de 8% y 27% en el esfuerzo pico en flexión y el índice de tenacidad en flexión debido al avance del grado de corrosión en el CRFA y a la consecuente reducción del diámetro de las fibras. De esta manera, Kosa y Naaman concluyen que las reducciones en la resistencia a flexión y en la tenacidad en la fase de propagación de la corrosión son controladas por la reducción del diámetro de fibras y no por la reducción de la adherencia entre la matriz y las fibras. En el presente estudio, aunque las propiedades en flexión del CRFA no fueron evaluadas a un largo plazo, esto es, exclusivamente fueron evaluadas las propiedades mecánicas en flexión del CRFA en la iniciación de los procesos de corrosión, se espera que en edades posteriores (etapa de propagación de la corrosión) ocurra una degradación generalizada sobre el desempeño del CRFA por causa no solo de la reducción del diámetro de fibras sino también del constante incremento de volumen de los productos de corrosión que inducen esfuerzos de tensión internos a la matriz cementante y la generación de fisuras con mayores espesores. De la misma forma, Alizade *et al.* (2016) sostienen que al alcanzar un grado avanzado de la corrosión en el CRFA, sus propiedades mecánicas se reducen por causa de la pérdida de volumen de acero en las fibras. De acuerdo con estudios previos (Serna y Arango, 2008; Berrocal *et al.*, 2015; Alizade *et al.*, 2016), en la etapa de propagación de la corrosión se espera un cambio gradual en el tipo de falla de las fibras de acero, de modo típico de extracción a fracturamiento de las fibras.

En la Figura 3d se observa que, para los ambientes acuoso y salino (A1 y A2), la reducción de los valores de resistencia en flexión asociados a una deflexión $\ell/150$, $f_{\ell/150}$, es más evidente para la dosificación de fibras de 27.5 kg/m³

SPANISH VERSION.....

que para la dosificación de 58.1 kg/m^3 . Esta tendencia indica que aunque se percibe un efecto de reforzamiento del concreto por el incremento en la dosificación de fibras de acero, los ambientes corrosivos inducen reducciones en las resistencias residuales del CRFA, lo cual provoca un menor desempeño post-fisura. La reducción de los valores de $f_{t,150}$ es mayor para el ambiente salino A2 que para el ambiente acuoso A1, debido a la agresividad del medio en presencia de iones cloruro.

En la Figura 3e se observa que, para la fase de iniciación de la corrosión, se presentan reducciones de los valores de tenacidad por la influencia de los ambientes corrosivos, principalmente para el ambiente salino A2, debido a la agresividad de este medio. La reducción de la tenacidades es más evidente para la dosificación de fibras de 58.1 kg/m^3 que para la dosificación de 27.5 kg/m^3 , debido principalmente al mayor contenido de fibras de acero.

Como se muestra en la Tabla 4, para el periodo de exposición de 60 días correspondiente a la fase de iniciación de la corrosión, la relación de resistencia equivalente en flexión, $R_{D,150}^f$, aumenta con el incremento de la dosificación de fibras de acero en el concreto y disminuye ligeramente por la exposición a los ambientes corrosivos, lo cual reduce el

desempeño en flexión del CRFA y la capacidad de transferencia de las fibras luego de la formación de la primera fisura. Por otro lado, en la Tabla 4 y en la Figura 4 se observan incrementos en los valores de ARS con el aumento de la dosificación de fibras. Sin embargo, se observó una reducción en los valores ARS de hasta 14%, correspondiente a la dosificación $D_f = 58.1 \text{ kg/m}^3$ al ambiente salino A2. Esto refleja pérdida de la capacidad de absorción de energía cuando el CRFA se expone a la acción de ambientes salinos.

A partir de las tendencias de los resultados medidos, en la Tabla 6 se proponen ecuaciones de predicción de los parámetros de desempeño mecánico a flexión del CRFA, y en la Tabla 7 se presentan las constantes empleadas para dicha determinación. La dispersión de estos parámetros 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. Con base en los valores de r de las ecuaciones, se puede afirmar que las ecuaciones propuestas resultan adecuadas y confiables, ya que están asociados a una fuerte correlación entre las variables medidas (valores de r cercanos a uno).

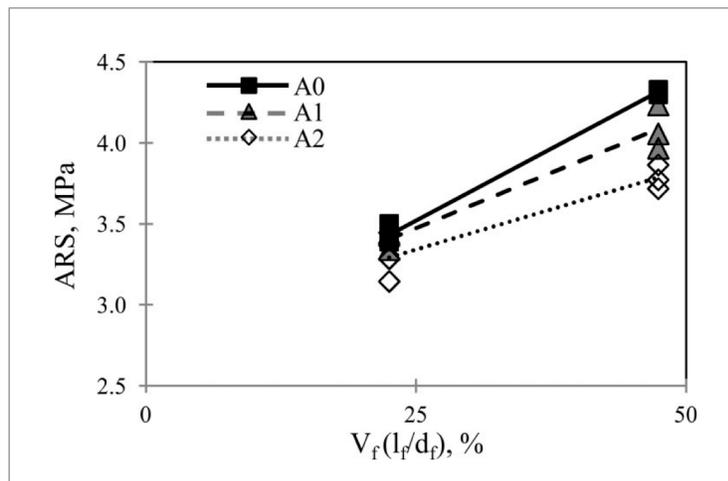


Figura 4. Tendencias del promedio de resistencias residuales, ARS

Tabla 6. Ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades en flexión del CRFA

Ecuación propuesta	Unidad
$f_{max} = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B] \sqrt{f_c}$	MPa
$f_{\ell/600} = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B] \sqrt{f_c}$	MPa
$f_{\ell/150} = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B] \sqrt{f_c}$	MPa
$T_{flex} = [A(V_f \times (l_f/d_f)) + B] \sqrt{f_c}$	Joule

Tabla 7. Constantes de las ecuaciones propuestas para la determinación en flexión del CRFA

Parámetro	Ambiente de exposición	Constante		Coeficiente de correlación
		A	B	
f_{max}	A0	0.0022	0.693	$r=0.95$
	A1	0.0024	0.630	$r=0.86$
	A2	0.0016	0.628	$r=0.95$
$f_{\ell/600}$	A0	0.0052	0.475	$r=0.93$
	A1	0.0037	0.493	$r=0.53$
	A2	0.0025	0.493	$r=0.62$
$f_{\ell/150}$	A0	0.0078	0.141	$r=0.95$
	A1	0.0051	0.204	$r=0.86$
	A2	0.0040	0.198	$r=0.95$
T_{flex}	A0	0.1848	5.832	$r=0.93$
	A1	0.1936	4.476	$r=0.85$
	A2	0.1649	4.766	$r=0.88$

4. Conclusiones

En este artículo se evaluó el comportamiento a flexión del CRFA sometido a la acción de ambientes corrosivos a corto plazo, lo cual corresponde a la fase de iniciación de la corrosión. En el artículo se proponen ecuaciones que permiten describir dicho comportamiento. Los resultados del estudio permiten concluir lo siguiente:

- Para la fase de iniciación del proceso de corrosión, donde las fisuras generadas en el concreto por los procesos de corrosión no han sido formadas, los resultados mostraron que el medio salino (NaCl de 3.5%) ocasionó pérdida aproximada de 10% y 11% en los valores de resistencia en flexión y tenacidad en flexión para CRFA con dosificación de fibras $D_f = 58.1 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. Por tanto, en presencia de ambientes salinos, el CRFA con mayor dosificación de fibras manifiesta grandes reducciones en su capacidad de absorción de energía, en comparación con ambientes acuosos o húmedos sin la presencia de cloruros.
- Para el tiempo de exposición de 60 días, periodo correspondiente a la etapa de iniciación de la corrosión, no se apreciaron efectos significativos de la corrosión en las fibras de acero; sin embargo, sí se observó un ligero efecto de mejoramiento en la deflexión y la adherencia. Este efecto favorable aparentemente mejora la ductilidad y la capacidad de absorción de energía de los especímenes, debido a la formación de cristales de sal en la microestructura que mejoran la fricción entre la matriz y las fibras. No obstante, con base en los estudios previos efectuados por otros autores y mencionados a lo largo de este artículo, se espera que para tiempos prolongados de exposición se pueda presentar una reducción en las propiedades mecánicas del CRFA, debido a la reducción en el diámetro de las fibras y a la formación de fisuras con mayores espesores por causa de la propagación de la corrosión.
- En general, durante la fase de iniciación del proceso de corrosión, la afectación de las propiedades mecánicas del concreto con fibras de acero fue mayor en el ambiente salino A2 que en el ambiente acuoso A1, debido al efecto de los iones cloruro (Cl⁻), los cuales son capaces de reaccionar con el oxígeno y disminuir el pH de la matriz. Esto no solo provoca una reducción gradual del diámetro de las fibras, sino también la generación de nuevos productos férricos tales como la magnetita y la goetita. Estos productos promueven esfuerzos de tensión en la matriz, los cuales inducen fisuras y posterior degradación de los elementos estructurales. Sin embargo, debido al corto tiempo de exposición utilizado en este estudio, no se apreciaron tales efectos; sólo se observaron ligeros efectos de reducción de hasta 11% en los parámetros de resistencia y desempeño mecánico correspondientes a una fase de iniciación del proceso de corrosión.

- A partir de las tendencias de los resultados experimentales, en este estudio se han propuesto ecuaciones que permiten describir el efecto de la fase de iniciación de la corrosión (evaluado a un corto plazo de 60 días) de ambientes acuosos y salinos sobre el CRFA sometido a esfuerzos de flexión. Las ecuaciones propuestas aplican para concretos de peso normal con masa unitaria entre 2250 kg/m³ y 2350 kg/m³, 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 24.8% y 49.7%.

5. Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones de la UMNG por el apoyo financiero para desarrollar el proyecto IMP-ING-2130. Adicionalmente, los autores expresan su agradecimiento las empresas Argos y Proalco (representante de Bekaert en Colombia), en especial a los Ingenieros Diego Velandia y Liliana Cardona, respectivamente. De la misma forma, a los ingenieros Sebastián Varela, Miguel Ospina y Felipe Riveros, y a los técnicos William Castaño y Oliverio Pinzón, quienes apoyaron la realización de las pruebas en los Laboratorios de Agregados y Concretos, y de Térmicas de la Universidad Militar Nueva Granada.

6. Referencias

- ACI-Comité 318 (2014)**, Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentarios. ACI-318. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, EUA, 2014, p. 588.
- ACI-Comitee 544 (2010)**, Report on the physical properties and durability of fiber-reinforced concrete. ACI-544.5R-10. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, EUA, 2010, p. 35.
- ACI-Comitee 544 (2002)**, State of the art report of fiber reinforced concrete. ACI-544.1R-96 (Reapproved 2002). American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, EUA, 2002, p. 66.
- ASTM C-78 (2015)**, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). ASTM-C-78. ASTM International. PA, USA, p.3.
- ASTM C-1399 (2010)**, Standard test method for obtaining average residual-strength of fiber-reinforced concrete. ASTM-C-1399. ASTM International. PA, USA, p.6.
- ASTM C-1609 (2012)**, Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). ASTM-C-1609. ASTM International. PA, USA, p.9.
- Alizade E., Jandaghi Alae F., Zabih S. (2016)**, Effect of steel fiber corrosion on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. Asian Journal of Civil Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 147-158.
- Anandan S., Manoharan S. V., Sengottian T. (2014)**, Corrosion effects on the strength properties of steel fibre reinforced concrete containing slag and corrosion inhibitor. International Journal of Corrosion, vol. 2014, p. 7. DOI:<http://dx.doi.org/10.1155/2014/595040>
- Angst U.M., Elsener B., Larsen C.K., Vennesland O. (2011)**, Chloride induced reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. Corrosion Science, vol. 53, no. 4, pp. 1451-1464. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.025>.
- Aperador W., Carrillo J., Cárdenas J. (2017)**, Effect of chloride ion on the durability properties of RC-65/35-BN steel fiber reinforced concrete. Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 18, no. 2, pp. 139-147.
- Banthia N., Foy C. (1989)**, Marine curing of steel fiber composites. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 1, pp. 86-96. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1989\)1:2\(86\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1989)1:2(86)).
- Bekaert (2005)**, Product Data Sheet Dramix RC65/35BN, Zwevegem, Belgium.
- Berrocal C.G., Löfgren I., Lundgren K., Tang L. (2015a)**, Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: influence of crack width, fibre type and loading conditions. Corrosion Science, vol. 98, pp.128-139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2015.05.021>.
- Berrocal C. G., Lundgren K., Löfgren I. (2015b)**, Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: state of the art. Cement and Concrete Research, vol. 80, pp.69-85. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.006>
- Carrillo J., Cárdenas J., Aperador W. (2015)**, Desempeño a tensión por compresión diametral del concreto reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN sometido al efecto del ion cloruro. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, Vol. 30, No. 3, pp. 49-61.
- 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.
- Frazão C., Barros J., Camões A., Alves A.C., Rocha L. (2016)**, Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. Cement and Concrete Research, vol. 79, pp. 112-122. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.005>
- Granju J.L., Balouch S.U. (2005)**, Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 572-577. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.032
- Hashimoto K., Toyoda T., Yokota H., Kono T., Kawaguchi T. (2014)**, Tension-softening behavior and chloride ion diffusivity of cracked ultra-high strength fiber reinforced concrete. Proceedings RILEM International Symposium on Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Marseille, pp. 257-264.
- Johnston C.D., Gray R.J. (1986)**, Flexural toughness and first-crack strength of fibre-reinforced concrete. Proceedings, 3rd RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Cement Composites, Sheffield, p 770.
- Kosa K., Naaman A.E. (1990)**, Corrosion of steel fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, vol. 87, no. 1, pp. 27-37. DOI: 10.14359/2337.
- Kwan W.H., Ramli M., Cheah C.B. (2014)**, Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment. Construction and Building Materials, vol. 63, pp. 62-71. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.004.
- Lambrechts A., Nemegeer D., Vanbrabant J., Stang H. (2003)**, Durability of steel fibre reinforced concrete. Proceedings: Sixth CANMET/ACI durability of concrete conference SP212, ACI, Michigan, USA.
- Nordström E. (2005)**, Durability of sprayed concrete steel fibre corrosion in cracks. Ph.D. thesis Luleå University of Technology, 2005.
- Ramli M., Kwan W.H., Abas N.F. (2013)**, Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. Construction and Building Materials, vol. 38, pp. 554-566. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.002.



- Raupach M., Dauberschmidt C., Eichler T. (2004)**, Corrosion behaviour of steel fibres in concrete containing chlorides. Proceedings: EUROCORR 2004 - European Corrosion Conference, Long Term Prediction and Modelling of Corrosion, Nice, pp. 12-15.
- Sadeghi-Pouya H., Ganjian E., Claisse P., Muthuramalingam K. (2013)**, Corrosion durability of high performance steel fibre reinforced concrete. Proceedings: Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan—August 18–21, 2013.
- Serna P., Arango S.E. (2008)**, Evolution of the flexural behaviour of precracked SFRC in marine environment. Proceedings: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications—BEFIB 2008, Chennai, India—September 17–19 2008, pp. 595–605.
- Stansbury E., Buchanan R. (2000)**, Fundamentals of electrochemical corrosion, ASM International, Ohio, USA.
- 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.
- Tuutti K. (1982)**, Corrosion of steel in concrete. The Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm, Report F0 4.
- 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.