

Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN

Effect of chloride ion on the compressive mechanical properties of RC-65/35-BN steel fiber reinforced concrete

Julián Carrillo*

Jhon Cárdenas Pulido**

William Aperador Chaparro***

Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)

* Programa de Ingeniería Civil Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). Bogotá (Colombia). Profesor e investigador, Ph.D. wjcarrillo@gmail.com.

** Programa de Ingeniería Civil Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). Bogotá (Colombia). Auxiliar de investigación, ingeniero civil. u1100907@unimilitar.edu.co.

*** Programa de Ingeniería Mecatrónica Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). Bogotá (Colombia). Profesor e investigador, Ph.D. wiliam.aperador@unimilitar.edu.co.

Correspondencia: Julián Carrillo. Carrera 11 n°. 101-80, Edificio F, piso 2. Bogotá (Colombia). A. A. 49300, Tel: 57-1-6500000, Ext. 1705.

Resumen

En este estudio se evalúa la influencia de dos ambientes corrosivos, a corto plazo, y de la dosificación de fibras sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) RC-65/35-BN. El programa experimental comprendió el ensayo de 54 especímenes de CRFA en forma de cilindros con fibras de acero, caracterizadas por una relación longitud/diámetro con valor de 65, con dosificaciones de fibra de 27.5 y 60 kg/m³. En cuanto a los ambientes de exposición, 18 cilindros fueron sumergidos y sometidos a la acción de un medio acuoso, 18 en un medio de solución NaCl al 3.5 % (ion cloruro) y 18 permanecieron en condiciones inalteradas durante 60 días. Para esta fase de iniciación de la corrosión se observó una pérdida aproximada del 2 % en la resistencia a compresión, una disminución del 6 % del módulo de elasticidad y un aumento del 13 % en la relación de Poisson del CRFA. Estos resultados demostraron que a corto plazo los ambientes corrosivos no afectan significativamente las propiedades mecánicas en compresión del CRFA utilizado en este estudio.

Keywords: concreto reforzado con fibras de acero, ion cloruro, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson.

Abstract

The influence of two corrosive environments on a short term and the fiber dosage on the compressive mechanical properties of RC-65/35-BN steel fiber reinforced concrete, SFRC, is assessed in this study. The experimental program comprised the test of 54 cylindrical-type SFRC specimens having steel fibers characterized by a length/diameter ratio of 65 and fiber dosages of 30 and 60 kg/m³. Regarding the exposure environments, 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, during 60 days. A reduction of 2 % in the compressive strength, a decrease of 6 % in the modulus of elasticity, and an increase of 13 % in the Poisson's ratio of the SFRC was observed for this phase of corrosion initiation. These results demonstrated that, on a short time, the corrosive environments do not affect significantly the mechanical properties under compressive stresses of the SFRC used in this study.

Palabras clave: steel fiber reinforced concrete, chloride ion, compressive strength, modulus of elasticity, Poisson ratio.

Fecha de recepción: 7 de diciembre de 2014
Fecha de aceptación: 10 de junio de 2015

INTRODUCCIÓN

Para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales en concreto y reducir la vulnerabilidad a la que se encuentran sometidos por acción de agentes externos tanto físicos como químicos actualmente existen métodos alternos al reforzamiento convencional de estos elementos.

El empleo de fibras como refuerzo de materiales frágiles ha sido contemplado desde tiempos antiguos [1]. Por ejemplo, a principios del siglo XX ya se habían desarrollado algunos estudios experimentales sobre la utilización de elementos discontinuos de acero para reforzamiento, tales como clavos, segmentos de alambres y chips metálicos [2]. Con el paso del tiempo, una amplia gama de materiales ha sido empleada para fibras, incluyendo cerámicos, plásticos, yeso, acero, fibras naturales, entre otros.

Las fibras de acero se plican en la estabilización de taludes, reparación y mantenimiento de túneles, reforzamiento de elementos estructurales, construcción de puentes, vías, muelles, etc.

El uso de fibras de acero proporciona al concreto el incremento de propiedades mecánicas, tales como las resistencias a tensión y a compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia al impacto y la abrasión, el control del fisuramiento, fatiga, durabilidad y absorción de energía [3]. En términos generales, la fibra de acero ocasiona que el concreto se vuelva no solo ligeramente menos resistente pero más dúctil cuando se somete a fuerzas axiales en compresión, sino también más resistente y dúctil cuando se somete a flexo-tensión [2]. Sin embargo, los concretos reforzados con fibras no son inmunes a los efectos de la intemperie, tal como la corrosión por acción del ion cloruro, la cual afecta de manera importante el refuerzo metálico y genera daños en estructuras de concreto reforzado, como puentes, edificios, cubiertas y demás estructuras expuestas. Cuando el concreto estructural se somete a ambientes corrosivos por la acción de la intemperie (sulfatos, carbonatación, cloruros, entre otros), se caracterizan dos fases en el proceso: la fase de iniciación (corto plazo) y la fase de propagación de la corrosión (largo plazo).

En este artículo se evalúa la influencia a corto plazo de dos ambientes corrosivos sobre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) sometido a esfuerzos de compresión.

Una revisión de la literatura reveló que existe relativamente poca información sobre las características de corrosión del concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) [4]-[7].

El conocimiento básico de las fuentes potenciales de corrosión y sus efectos a corto plazo propiciarán una mejor predicción de las propiedades y la durabilidad del CRFA. Esto permitirá una evaluación racional de tales efectos en el análisis y diseño, y proporcionará un procedimiento efectivo de control o disminución de la corrosión en estructuras con CRFA.

METODOLOGÍA

El programa experimental incluyó el ensayo de 54 especímenes cilíndricos. En el estudio se usaron fibras de acero Dramix RC-65/35-BN con relación de aspecto (longitud/diámetro) de 65 y dosificaciones de fibras de acero de 30 y 60 kg/m³, equivalentes a fracciones de volumen de fibras de 0.38 y 0.76 % con respecto al volumen total de concreto.

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 TMN de 10 mm. Para garantizar el asentamiento de la mezcla y su manejabilidad se utilizó un aditivo superplastificante denominado Viscocrete 2100 (Aditivo 1) de Sika [8] y un aditivo reductor de agua denominado Plastiment AD 20 (Aditivo 2) de Sika [9]. 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

Materiales	Cemento	Ceniza	Arena 1	Arena 2	Grava	Agua	Aditivo 1	Aditivo 2
Cantidad, kg/m ³	321.3	35.7	695.6	173.9	869.5	185.0	0.25 %	0.45 %
Densidad, g/cm ³	3.12	2.09	2.62	2.60	2.43	-	-	-

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 minutos para las dos dosificaciones, lo cual 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 minutos [10].

Tipo de fibras de acero

En 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. Se empleó un solo tipo de mezcla con diferentes dosificaciones de fibras, D_f : concreto simple (CS) sin adición de fibras y CRFA con dosificaciones de 30 y 60 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 se contempla en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) [11] para refuerzo mínimo por cortante en vigas (60 kg/m³).

Tabla 2. Características de las fibras empleadas

Variable	Descripción		
Fibra	Tipo	RC-65-35-BN	
	Longitud, l_f , mm	35	
	Diámetro, d_f , mm	0.55	
	Relación de aspecto, l/d_f	~ 65	
	Resistencia a tensión, MPa	1345	
	Módulo de Young, MPa	210000	
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

Se fabricaron 54 cilindros 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 su superficie de una película de curado marca Sika de referencia Antisol [12]. La película empleada es una emulsión acuosa de parafina que garantiza el desarrollo de la resistencia del concreto. Luego, los especímenes fueron almacenados en un cuarto para su posterior ensayo.

Tipos de ambientes

Se simularon dos tipos de ambientes corrosivos. De esta manera, 18 especímenes fueron sometidos a la acción de un ambiente acuoso y otros 18 a la acción de un ambiente salino (ion cloruro). Los resultados fueron comparados con los 18 especímenes en condiciones normales (no alteradas). La notación de los ambientes se presenta en la tabla 3. Las temperaturas indicadas en la tabla corresponden al valor promedio de las mediciones realizadas durante el tiempo de exposición.

Tabla 3. Descripción de los ambientes de exposición

Abreviación	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)

Después que los especímenes desarrollaron su resistencia máxima (edad de 90 días), 36 fueron sometidos al ambiente A1 o A2 durante 60 días. A continuación, dichos especímenes fueron extraídos de su inmersión y almacenados, bajo condiciones de humedad y temperatura ambiente, junto con los otros 18 especímenes del ambiente A0. Finalmente, los ensayos mecánicos fueron realizados continuamente durante dos días. De esta manera, la edad de los especímenes al momento de los ensayos fue de aproximadamente 150 días.

Métodos de ensayo

Se efectuaron ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas del concreto simple (CS) y del concreto reforzado con fibras de acero (CRFA).

Estos ensayos fueron realizados con objeto de determinar el efecto de los entornos corrosivos sobre las propiedades mecánicas en compresión, es decir, degradación de su resistencia y de su desempeño. La descripción de los ensayos mecánicos se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. 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		3	3	3	3	3	3	3	3	3	27	
Módulo de elasticidad, E_c , y relación de Poisson, ν	Cilindro	3	3	3	3	3	3	3	3	3	27	54

Para los ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson, sobre cada espécimen se aplicó una carga axial sin excentricidades a través de una prensa universal, con un error instrumental de 0.01 MPa en cada medición. Se utilizaron discos de neopreno para garantizar la distribución uniforme de los esfuerzos durante la aplicación de la carga. Para los ensayos de módulo de elasticidad y relación de Poisson, los desplazamientos se registraron mediante transductores de desplazamiento tipo LVDT y deformímetros, los cuales tienen errores instrumentales de 0.001 mm y 0.005 mm/mm, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el CRFA fueron determinadas no solo las curvas esfuerzo-deformación en los ensayos de compresión, sino también los valores de módulo de elasticidad y relación de Poisson del compuesto, con diferentes dosificaciones de fibras y en diferentes ambientes de exposición. Los resultados se presentan en función de las fracciones de volumen de fibras. Estas fracciones de fibras se determinaron con base en las dosificaciones reales de fibras, las cuales fueron medidas siguiendo los lineamientos de la norma EN 14488 7-07 [13]. Los resultados de la dosificación, D_f , y la fracción de volumen, V_f , reales de fibras se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Contenido real de fibras para cada dosificación

	D_f kg/m ³		Fracción de volumen, V_f %	
Nominal	30.0	60.0	0.38	0.76
	28.8	58.5	0.36	0.74
Medida	25.6	58.7	0.33	0.75
	28.3	57.1	0.36	0.73
X	27.5	58.1	0.35	0.74
CV, %	5.1	1.2	4.0	1.1

Para efectos del análisis de las propiedades mecánicas del CRFA, en adelante se emplearán los valores reales de dosificación de fibras, D_f y de fracción de volumen de fibras, V_f .

Resistencia a compresión

Cuando los especímenes cilíndricos son sometidos a cargas de compresión, las fibras de acero controlan la abertura y la propagación de las microfisuras que se generan debido a las fuerzas de tensión transversal. Esto puede provocar un incremento en la resistencia a compresión y en su capacidad de deformación en compresión. Sin embargo, cuando se adiciona fibras de acero al concreto la porosidad incrementa y, por tanto, puede disminuir la resistencia a compresión. Estos dos efectos combinados tienden a “cancelarse” entre sí, provocando un efecto poco significativo de las fibras en la resistencia a compresión del concreto [14].

En la figura 1 se observa el tipo de falla generada en los especímenes cilíndricos con adición de fibras y sin estas. Para el CS se presentó una falla de compresión tipo cónica y dividida, correspondiente al patrón típico de falla observado cuando se utilizan discos de neopreno [15]. Para el CRFA se presentó una falla de compresión tipo transversal, ya que las fibras contribuyen a reducir el agrietamiento en la falla del espécimen, lo cual permite afirmar que la falla a compresión del CRFA se produjo por adherencia en la matriz.

Las curvas esfuerzo-deformación longitudinal en compresión para cada grupo de especímenes se presentan en las figuras 2a1 a 2c3. El promedio de las tendencias se muestran en las figuras 2d1 a 2d3.

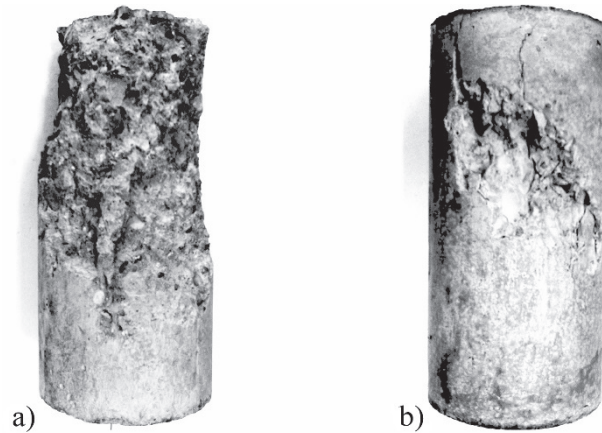


Figura 1. Falla característica de especímenes en compresión: a) CS, b) CRFA

El efecto de los ambientes corrosivos y de las tendencias obtenidas en compresión se muestran en la figura 3. El eje de las abscisas de la figura se presenta en términos del producto entre la fracción de volumen y la relación de aspecto de las fibras [$V_f(l/d_f)$]. Los valores de l/d_f y los valores reales de V_f se indican en las tablas 2 y 5, respectivamente. En la figura 3, f_{co} es el valor de resistencia a compresión del concreto sin fibras, f_c es la resistencia a compresión del concreto con fibras y ϵ_0 es la deformación unitaria asociada al valor máximo de resistencia a compresión.

En la figura 3a, para el ambiente A0 y dosificación de 27.5 kg/m^3 se presenta una ligera reducción de los valores de resistencia a compresión, debido probablemente a los vacíos atrapados por la inclusión de las fibras. No obstante, para el mismo ambiente A0 y dosificación de 58.1 kg/m^3 se presenta un incremento en la resistencia a compresión en comparación con la dosificación de 27.5 kg/m^3 , debido al aumento en la dosificación de fibras de acero.

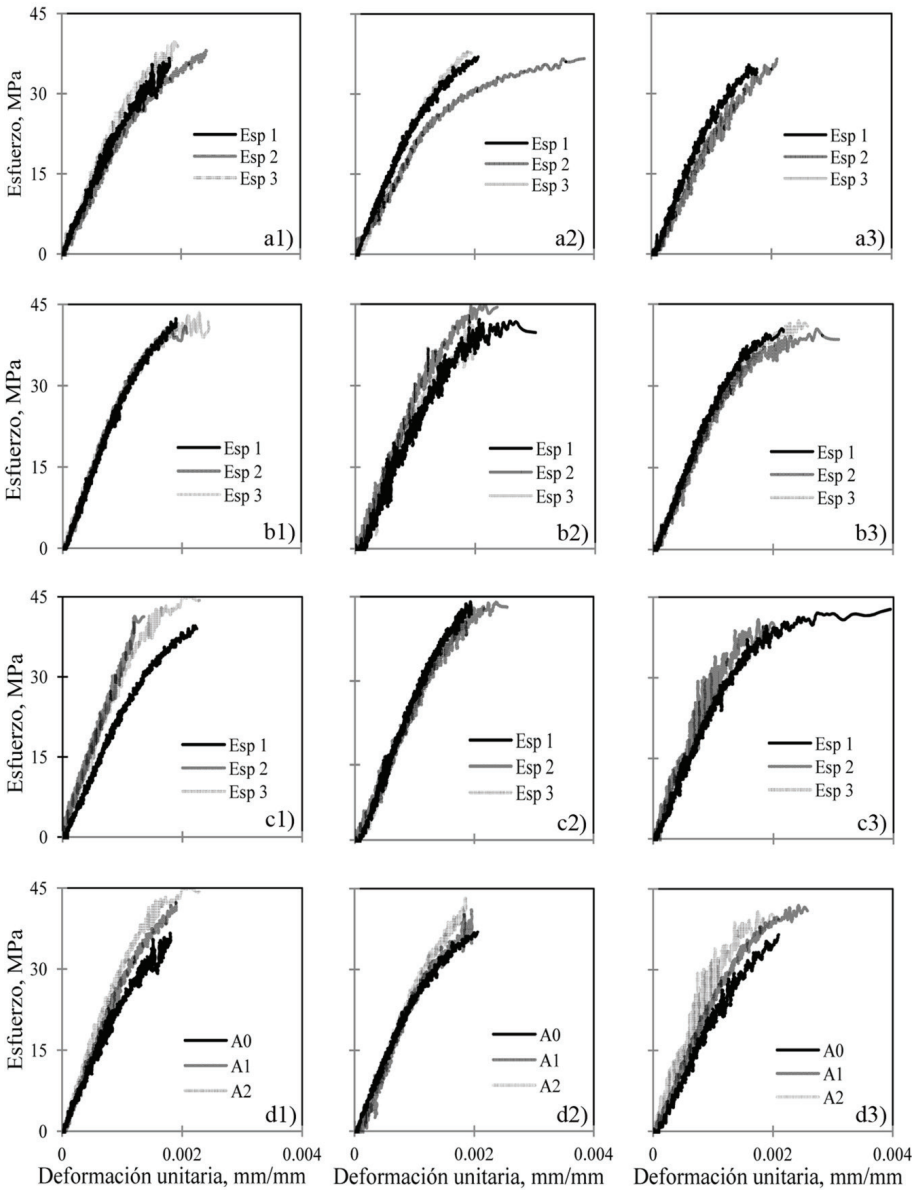


Figura 2. Curvas esfuerzo-deformación en compresión: a1) A0-0, a2) A0-27.5, a3) A0-58.1, b1) A1-0, b2) A1-27.5, b3) A1-58.1, c1) A2-0, c2) A2-27.5, c3) A2-58.1, d1) $D_f = 0 \text{ kg/m}^3$, d2) $D_f = 27.5 \text{ kg/m}^3$, d3) $D_f = 58.1 \text{ kg/m}^3$.

Eren y Marar [16] encontraron que las adiciones de fibra de acero mayores del 1 % de fracción de volumen mejoran la adherencia entre el agregado y la

pasta de cemento. Para fracciones de volumen de fibras mayores de 1 % se podría formar una red o camino por donde escapan las burbujas de aire, y así se reduce el porcentaje de aire atrapado en el concreto. Esto naturalmente podría mejorar esa adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. De otro modo, fracciones de volumen de fibras menores de 1 % provocarían una gran cantidad de aire atrapado, lo cual reduciría la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. Por tanto, Eren y Marar concluyeron que se presenta un mejor comportamiento en compresión del CRFA con fracciones de volumen mayores al 1 %. Además, debido al incremento de adherencia entre la pasta de cemento y el agregado, las fisuras térmicas y microfisuras a temprana edad son minimizadas. Esto incrementaría la resistencia a compresión. Sin embargo, Eren y Marar también observaron que fracciones de volumen de fibras mayores a 1.5 % dificultan la compactación del concreto fresco, lo cual reduce la resistencia a compresión debido a las burbujas de aire que quedan atrapadas.

Adicionalmente, en la figura 3^a, para el ambiente A0 y dosificación de fibra de 58.1 kg/m³ se aprecia un efecto de reforzamiento de las fibras en el concreto, en el que se manifiesta el aumento de la resistencia a compresión de los especímenes, lo cual representa un incremento en valores cercanos al 3 %.

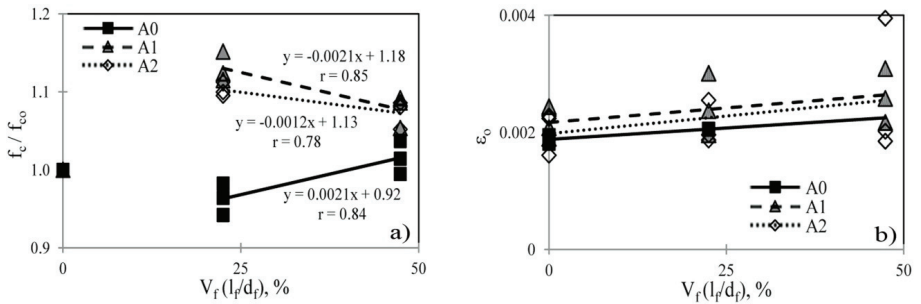


Figura 3. Tendencias obtenidas en compresión: a) f_c , b) ϵ_s

Cengiz y Okan [17] observaron que la adición de fibras de acero al concreto no mejora la resistencia a compresión a largo plazo. En general, la adición de fibras de acero solo produce un leve incremento de hasta el 10 % en comparación con un concreto convencional. Por otro lado, estudios experimentales previos [18] reportan incrementos en la resistencia a compresión del CRFA, los cuales van desde incrementos leves hasta de 23 % para concretos con

fracción de volumen de fibras de 2 %, relación de aspecto de la fibra de 100 y tamaño máximo del agregado de 19.1 mm ($\frac{3}{4}$ pulg), en cilindros de dimensiones de 150 × 300 mm.

Balendran *et al.* [19] concluyeron que bajos volúmenes de fracción de fibras de acero tienen leve efecto en la resistencia a compresión para concretos normal y de peso ligero.

Neves y Fernandes [20] afirman que en ocasiones la adición de fibras de acero al concreto reduce la resistencia a compresión. Esto puede ser atribuido al hecho de que la adición de fibras causa perturbación de la matriz, lo cual puede resultar en una mayor porosidad.

Por su parte, Carrillo *et al.* [21] realizaron una investigación experimental para evaluar la resistencia a compresión, tensión y flexión en especímenes de CRFA. Observaron que la resistencia a compresión del CRFA disminuye levemente con el producto $[V_f(l/d_f)]$, y atribuyeron el efecto a la sustitución del agregado grueso por fibras de acero y por el aumento del contenido de aire en la mezcla.

Fatih *et al.* [22] estudiaron la resistencia a compresión del concreto reforzado convencionalmente y el concreto con 30 y 60 kg/m³ de fibras de acero. En el estudio se observó que la resistencia a compresión disminuye levemente con el incremento de la dosificación. También se observó que cuando la resistencia a compresión cae ligeramente, la tenacidad en compresión disminuye con el incremento de la dosificación de fibras.

Cengiz y Okan [17] también encontraron que para el CRFA y con adición de ceniza volante la ceniza disminuye la resistencia a compresión, pero las fibras de acero no son capaces de recuperar esa pérdida de resistencia ocasionada por la ceniza. Sin embargo, si inicialmente se adiciona a la mezcla menor cantidad de agua (manteniendo la trabajabilidad), esta pérdida de resistencia puede ser recuperable.

En cuanto al efecto de los ambientes corrosivos, en este estudio se observa que para la fase de iniciación de la corrosión (tiempo de exposición de 60 días) la influencia de los ambientes corrosivos en el desempeño a compresión de los especímenes en concreto simple y concreto con fibras de acero

es relativamente mínima, ya que se presentan reducciones máximas en los valores de resistencia a compresión cercanas a 2 %.

En la figura 3a se observa que para los ambientes A1 y A2 los valores de resistencia a compresión disminuyen con el aumento en la dosificación, probablemente debido a una perturbación generada en la interface matriz-fibras por causa de la acción de los entornos corrosivos. En la figura 3b se observa que la capacidad de deformación del concreto aumenta con el incremento en la dosificación de fibras. Adicionalmente, se observa que la acción de los ambientes corrosivos incrementa la capacidad de deformación de los especímenes en CRFA. Sin embargo, este incremento es mayor para el ambiente salino A2, ya que este ambiente proporciona mayor deformación a la matriz al reaccionar con la solución NaCl y cristalizar las moléculas de sal. De esta manera, se aumenta la adherencia entre la matriz y las fibras, y se genera mayor capacidad de deformación del concreto en este medio.

Kosa y Naaman [23] realizaron una extensa investigación experimental sobre el deterioro del CRFA debido a la corrosión de las fibras. En dicho estudio los especímenes de concreto reforzado con fibras fueron saturados en solución NaCl durante 180 días. Los especímenes mostraron bastante óxido en su superficie y 10 % de reducción del diámetro mínimo de las fibras; sin embargo, los especímenes no presentaron reducción significativa en la resistencia a compresión. Similarmente, en esta investigación también fueron evidenciados patrones corrosivos tales como algunas delaminaciones y cambios de color plateado a color naranja en la superficie de algunas fibras. No obstante, para la fase de iniciación de la corrosión (tiempo de exposición de 60 días), para los ambientes A1 y A2 no se evidenció una disminución considerable en la resistencia a compresión del CRFA, tal como se muestra en la figura 3a.

En contraste, Ditao *et al.* [24] investigaron las propiedades del CS y el CRFA con fracciones de volumen de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 %. Los especímenes fueron sometidos a ciclos de congelamiento y descongelamiento, y en solución NaCl al 3.5 %. Los resultados demostraron que la adición de fibras al concreto provoca un incremento del 10 hasta 25 % en los valores de resistencia a compresión.

Módulo de elasticidad

En esta investigación los valores de módulo de elasticidad fueron determinados mediante la utilización de transductores de desplazamiento fijados

a un dispositivo compresómetro, y de deformímetros o galgas extensiométricas adheridas a la superficie del concreto. En la tabla 6 se muestran los valores obtenidos por las dos técnicas, y en la figura 4 las tendencias de los resultados.

Tabla 6. Valores medidos de módulo de elasticidad para cada tipo de mezcla

Ambiente	Parámetro estadístico	Dosificación, D_f , kg/m ³					
		Transductor			Deformímetro		
		0	27.5	58.1	0	27.5	58.1
A0	X, MPa	27341	26224	25204	26978	25985	25235
	CV, %	0.4	1.8	0.6	0.04	0.2	0.4
A1	X, MPa	27061	26012	25357	26750	25930	25096
	CV, %	0.8	0.7	0.8	0.1	0.2	0.2
A2	X, MPa	26209	25697	25028	26309	25641	24905
	CV, %	0.7	0.3	0.3	0.5	0.4	1.0

En la tabla 7 se presenta la variación en las mediciones del módulo de elasticidad con el transductor y el deformímetro. Como se muestra en la tabla 7 y en la figura 4, los resultados obtenidos por las dos técnicas son similares, ya que la mayor variación es de 1.33 %. En este estudio se tomaron como referencia los valores obtenidos mediante los deformímetros, porque se considera una medición más exacta debido a su adherencia directa con el espécimen. Adicionalmente, mediante los deformímetros fue posible medir la curva completa esfuerzo-deformación unitaria en compresión de los especímenes.

Tabla 7. Variación en las mediciones del transductor y el deformímetro

Ambiente	Variación, %		
	Dosificación, D_f , kg/m ³		
	0	27.5	58.1
A0	1.33	0.91	0.12
A1	1.15	0.31	1.03
A2	0.38	0.22	0.49

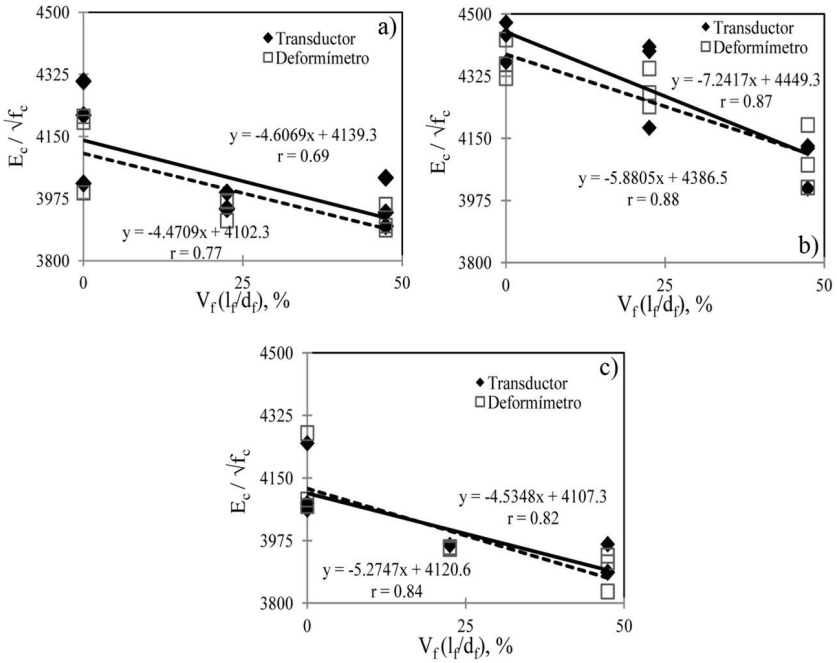


Figura 4. Módulo de elasticidad medido mediante transductor y deformímetro: a) A0, b) A1, c) A2

En la figura 5 se presenta la influencia de la dosificación de fibras de acero y de los ambientes corrosivos en los valores de módulo de elasticidad de las mezclas y las tendencias obtenidas. Como se observa en dicha figura, el módulo de elasticidad del CRFA disminuye levemente con el aumento de la dosificación de fibras de acero. Para el ambiente en condiciones normales A0, en esta figura se observa una disminución de 4 y 8 % de los valores de módulo de elasticidad para dosificaciones de 27.5 y 58.1 kg/m^3 de fibras de acero, respectivamente. En el estudio de Fatih *et al.* [22] se observó que el módulo de elasticidad disminuyó 7 y 12 % para dosificaciones de 30 y 60 kg/m^3 de fibras de acero con respecto a los valores de módulo de elasticidad del concreto simple. En el estudio de Cengiz y Okan [17] también se observó que el módulo de elasticidad se reduce con el aumento de dosificación de fibras.

En cuanto al efecto de la corrosión, en la figura 5 se observa que la influencia de los ambientes corrosivos en los valores de módulo de elasticidad es leve, registrándose reducciones de hasta un 6 % del módulo de elasticidad del

CRFA en comparación con el CS, para el ambiente salino A2. Dicha afectación por ion cloruro fue mayor en el ambiente A2 debido a la agresividad del medio salino.

En el estudio de Kosa y Naaman [23] no se observó una reducción significativa en el módulo de elasticidad, e indican que la corrosión no produjo ninguna fisura; es decir, sugieren que la exposición a ambientes corrosivos no provoca fisuramiento o un cambio notable en el módulo de elasticidad inicial del CRFA.

Mu *et al.* [24] evaluaron el deterioro del concreto sometido a la combinación conjunta de cargas en flexión, ciclos de congelamiento/descongelamiento y ataque por sales de cloruros. En dicho estudio se observó que la reducción del módulo de elasticidad del concreto es menor cuando este está sometido a solución de sales de cloruros que cuando está en presencia de agua, debido al sobreenfriamiento resultante de las sales de cloruros. Como se muestra en la figura 5, esta tendencia también fue evidenciada en esta investigación, ya que el medio salino presentó un valor de temperatura de 10.5 °C, el cual es menor al valor de temperatura del medio acuoso de 20.6° C. Este fenómeno de sobreenfriamiento de la solución NaCl ocurre cuando la sal sustrae energía al agua para poder disolverse en ella.

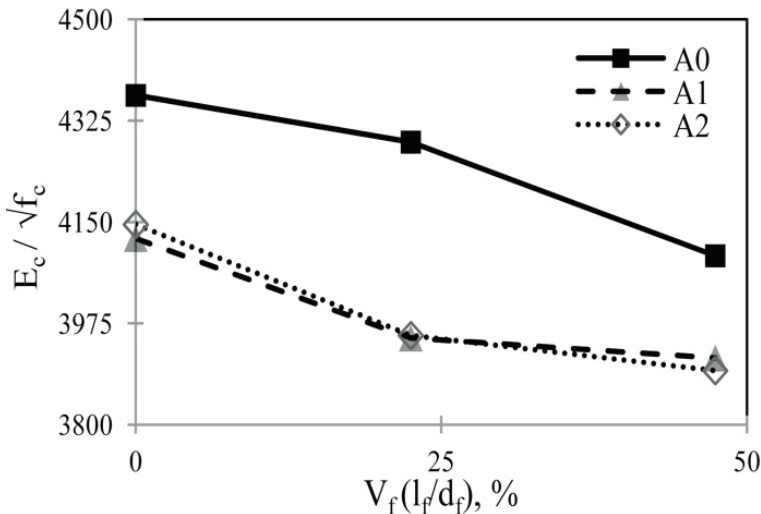


Figura 5. Tendencias obtenidas en el módulo de elasticidad utilizando el deformímetro

Relación de Poisson

La relación de Poisson fue medida mediante el dispositivo compresómetro-extensómetro y los dos transductores sujetos a este (longitudinal y transversal). En la tabla 8 se resumen los valores obtenidos de la relación de Poisson para cada tipo de mezcla. En la figura 6 se presenta la influencia de las dosificaciones y de los ambientes corrosivos en los valores de relación de Poisson de las mezclas y las tendencias obtenidas.

En la figura 6 se observa que el aumento de la dosificación de fibras genera una disminución casi constante de 0.01 en los valores de relación de Poisson para la dosificación de 27.5 kg/m³ y de 0.02 para la dosificación de 58.1 kg/m³; es decir, para el ambiente A0 la relación de Poisson disminuye de un valor igual a 0.137 en concreto simple a un valor igual a 0.125 para dosificación de 27.5 kg/m³ y a un valor igual a 0.117 para dosificación de 58.1 kg/m³. Para el ambiente A1, la relación de Poisson disminuye de un valor igual a 0.143 en concreto simple a un valor igual a 0.134 para dosificación de 27.5 kg/m³ y a un valor igual a 0.129 para dosificación de 58.1 kg/m³. Para el ambiente A2, la relación de Poisson disminuye de un valor igual a 0.155 en concreto simple a un valor igual a 0.148 para dosificación de 27.5 kg/m³ y a un valor igual a 0.134 para dosificación de 58.1 kg/m³.

Tabla 8. Valores medidos de la relación de Poisson para cada tipo de mezcla

Ambiente		Dosificación, D_f , kg/m ³		
		0	27.5	58.1
A0	X	0.137	0.125	0.117
	CV, %	1.9	2.7	2.7
A1	X	0.143	0.134	0.129
	CV, %	2.7	0.9	1.6
A2	X	0.155	0.148	0.134
	CV, %	2.6	2.0	2.3

En el estudio de Carrillo *et al.* [21] se encontró que el aumento de la dosificación de las fibras causa una disminución de la relación de Poisson a un valor casi constante de 0.15, debido al efecto de confinamiento que le proporcionan las fibras al concreto en compresión.

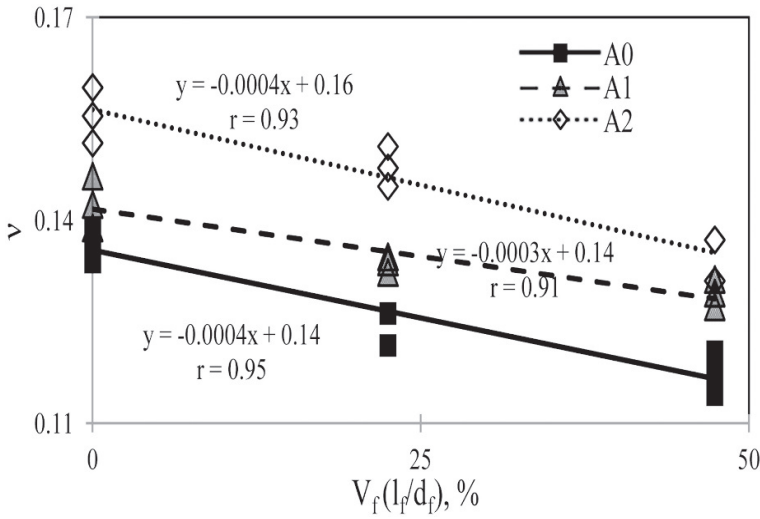


Figura 6. Tendencias obtenidas en la relación de Poisson

Por otro lado, el efecto de los ambientes provoca un aumento casi constante de 0.01 en los valores de la relación de Poisson. En general, los ambientes corrosivos generaron un incremento en los valores de la relación de Poisson del CRFA de hasta un 13 % y, por tanto, el confinamiento que proporcionan las fibras al concreto se afectó debido a su deterioro. Además, para la fase de iniciación de la corrosión (tiempo de exposición de 60 días) se observó que el efecto de aumento en el medio salino fue menor que el efecto de aumento proporcionado por el medio acuoso.

A partir de las tendencias de los resultados medidos, en la tabla 9 se proponen modelos de predicción de los parámetros de desempeño mecánico del CRFA en compresión y en la tabla 10 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 r de las ecuaciones se puede afirmar que los modelos de predicción propuestos son adecuados, ya que sus valores varían entre 0.77 y 0.95; es decir, son cercanos a 1. Lo anterior indica que existe una estrecha relación entre los parámetros observados y los calculados.

Tabla 9. Ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas del CRFA en compresión

Propiedad	Ecuación Propuesta	Unidad
Resistencia a compresión	$f_c = [A (V_f \times (l_f/d^d)) + B] f_{c0}$	MPa
Módulo de elasticidad	$E_c = [A (V_f \times (l_f/d^d)) + B] \sqrt{f_c}$	MPa
Relación de Poisson	$\nu = [A (V_f \times (l_f/d^d)) + B]$	-

Tabla 10. Constantes de las ecuaciones propuestas para la determinación de las propiedades mecánicas del CRFA

Parámetro	Ambiente de exposición	Constante		Coeficiente de correlación
		A	B	
f_c	A0	0.0021	0.92	$r = 0.84$
	A1	-0.0021	1.18	$r = 0.85$
	A2	-0.0012	1.13	$r = 0.78$
E_c	A0	-4.4709	4102.3	$r = 0.77$
	A1	-7.2417	4449.3	$r = 0.87$
	A2	-5.2747	4120.6	$r = 0.84$
ν	A0	-0.0004	0.1356	$r = 0.95$
	A1	-0.0003	0.1416	$r = 0.91$
	A2	-0.0004	0.1563	$r = 0.93$

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos realizados se evaluó el comportamiento del CRFA bajo esfuerzos de compresión y sometido a la acción de entornos corrosivos, y se proponen ecuaciones que permiten describir dicho comportamiento.

Los resultados del estudio permiten concluir que el incremento de las resistencias mecánicas del CRFA depende de la 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 el efecto de las fibras de acero en la resistencia a compresión es poco significativo, y se presentan incrementos en sus valores de hasta 3 %.

Es importante mencionar que el tiempo de exposición de este estudio corresponde a la fase de iniciación del proceso de corrosión. Para esta fase de iniciación, el medio salino ocasionó una disminución en los valores de resistencia a compresión de hasta un 2 %. También fueron evidenciados algunas delaminaciones y patrones de cambio de color de plateado a color naranja en la superficie de algunas fibras.

Con base en los resultados observados en este estudio y los reportados por otros autores es posible concluir que el efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas en compresión del CRFA no es apreciable, ya que a pesar de los patrones observados, su desempeño para periodos de exposición prolongados no difiere del encontrado en este estudio (corto plazo).

En cuanto al módulo de elasticidad y la relación de Poisson de los especímenes en CRFA, se observó que la adición de fibras ocasiona una disminución de 4 y 8 % de los valores de módulo de elasticidad para las dosificaciones de 27.5 y 58.1 kg/m³, respectivamente. Esto se debe al incremento en el contenido de aire por la inclusión de una mayor cantidad de fibras de acero al concreto.

Adicionalmente, se observó que la influencia de los ambientes corrosivos en los valores de módulo de elasticidad es leve, y se registran reducciones de hasta 6% del módulo de elasticidad del CRFA en comparación con el CS para el ambiente salino A2. Dicha afectación por ion cloruro fue mayor debido al efecto de sobreenfriamiento del medio salino. Por otro lado, los ambientes corrosivos incrementaron hasta en 13 % los valores de la relación de Poisson del CRFA y, por tanto, el confinamiento que proporcionan las fibras al concreto se afectó debido a su deterioro. Además, para la fase de iniciación de la corrosión (tiempo de exposición de 60 días) se observó que el medio salino genera en los valores de relación de Poisson del CRFA un aumento mayor al proporcionado por el medio acuoso.

Finalmente, las ecuaciones propuestas aplican para concretos de peso normal con masa unitaria entre 2250 y 2350 kg/m³, resistencia a compresión entre 35 a 45MPa, con fibras de acero de extremos en forma de gancho de resistencia a tensión de 1345 MPa y valor del producto $[V_f(l_f/d_p)]$ que varíe entre 22.5 y 47.4 %.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones de la UMNG por el apoyo financiero para desarrollar el proyecto IMP-ING-1574. Asimismo, a las empresas Argos y Proalco (representante de Bekaert en Colombia), en especial a los ingenieros Diego Velandia y Liliana Cardona. Adicionalmente, 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.

REFERENCIAS

- [1] ACI Committee 544, "State of the-art report on fiber reinforced concrete", American Concrete Institute, Detroit, MI, Tech. Rep. ACI 544.1R-96, 1996.
- [2] A. E. Naaman, "Fiber reinforcement for concrete", *Concrete International: Design and Construction*, vol. 7, n° 3, pp. 21-25, marzo de 1985.
- [3] B.W. Xu and H.S Shi, "Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 3468-3474, agosto de 2009. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.08.017.
- [4] ACI Committee 222, "Corrosion of metals in concrete against corrosion", American Concrete Institute, Detroit, MI, Tech. Rep. ACI 222R-85, 1985.
- [5] R. Mu, C. Miao, X. Luo, and W. Sun, "Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1061-1066, Julio de 2002. DOI:10.1016/S0008-8846(02)00746-9.
- [6] G. Chen, M.N.S. Hadi, D. Gao, and L. Zhao, "Experimental study on the properties of corroded steel fibers", *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 165-172, marzo de 2015. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.082.
- [7] C. Frazão, A. Camões, J. Barros, and D. Gonçalves, "Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 80, pp. 155-166, abril de 2015. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.061.
- [8] Hoja técnica de producto Sika Viscocrete 2100. Sika S. A. Bogotá, D. C., 2014.
- [9] Hoja técnica Plastiment AD 20, Sika S. A. Bogotá, D. C., 2013.
- [10] Product Data Sheet Dramix RC-65/35-BN, Bekaert S.A. Zvevegem, Belgium, 2005.
- [11] Reglamento colombiano de construcción sismo-resistente, NSR-10, Asociación de Ingeniería Sísmica, p.1536, 2010.

- [12] Hoja técnica Antisol blanco, Sika S. A. Bogotá, D. C., 2012.
- [13] EN 14488-7. Asociación Española de Normalización y Certificación, *Ensayos de hormigón proyectado Parte 7 - Contenido de fibras del hormigón reforzado con fibras*. Madrid, 2007.
- [14] S. Yazıcı, G. İnan, and V. Tabak, "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, 2007. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025.
- [15] ASTM C-39. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA, 2014.
- [16] Ö. Eren and K. Marar, "Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 981-988, 2009. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.05.014.
- [17] D. Cengiz and K. Okan, "Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 392-399, 2009. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.002.
- [18] G. R. Williamson, "The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete", *Fiber Reinforced Concrete*, SP- 44. Detroit: American Concrete Institute, pp. 195-207, 1974.
- [19] R. V. Balendran, F.P Zhou, A Nadeem, A.Y.T Leung, "Influence of steel fibers on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete", *Building and Environment*, vol. 37, pp. 1361-1367, 2002. DOI: 10.1016/S0360-1323(01)00109-3.
- [20] R. D. Neves and J. C. O. Fernandes de Almeida, "Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete", *Structural Concrete*, vol. 6, pp. 1464-1467, 2005.
- [21] J. Carrillo, W. Aperador y G. González, "Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 14, n° 3, pp. 435-450, 2013.
- [22] A. Fatih, T. Haktanir, and K. Ari, "Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams", *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 654-661, 2007. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.12.006.
- [23] K. Kosa and A. E. Naaman, "Corrosion of steel fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 87, pp. 27-37, 1990. DOI: 10.14359/2337.
- [24] D. Niu, L. Jiang, M. Bai, and Y. Miao, "Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition", *Materials and Design*, vol. 44, pp. 267-273, 2013. DOI:10.1016/j.matdes.2012.07.074.

- [25] R. Mu, C. Miao, X. Luo, and W. Sun, "Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1061-1066, 2002. DOI:10.1016/S0008-8846(02)00746-9.