

Energía de fractura en modo II del concreto de resistencia normal reforzado con fibras cortas de acero

FABIÁN AUGUSTO LAMUS BÁEZ¹

SERGIO MAURICIO SEGURA ARENAS²

RESUMEN

En este trabajo se determinó experimentalmente el valor de la energía de fractura en modo II para concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC) a partir de mezclas de concreto de resistencia normal en Colombia. Se compararon los comportamientos obtenidos para probetas ensayadas a cortante. Se realizaron tres tipos de mezclas de concreto con relaciones agua/cemento: 0,58, 0,50 y 0,40, sin refuerzo y reforzadas con tres cuantías volumétricas de fibra de acero: 0,5, 1,0 y 2,0 %. La energía específica de fractura en modo II se estimó a partir del modelo de fisura cohesiva empleando el método de trabajo de fractura a partir de los datos experimentales.

Palabras clave: energía de fractura, SFRC, mecánica de fractura, concreto.

¹ Universidad Nacional de Colombia. Candidato a doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de Colombia. Docente asistente, Programa de Ingeniería Civil. Profesor asistente, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: falamus@unisalle.edu.co

² Ingeniero civil, Universidad La Gran Colombia. Candidato a magíster en Ingeniería Civil, Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", Bogotá, Colombia. Correo electrónico: sergio.segura@mail.escuelaing.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 20 DE FEBRERO DE 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 5 DE MAYO DE 2013

Cómo citar el artículo: Lamus Báez, F. A. y Segura Arenas, S. M. (2013). Energía de fractura en modo II del concreto de resistencia normal reforzado con fibras cortas de acero. *Épsilon* (20), 159-171.

Energy of Type II Fracture in Normal Resistance Concrete Reinforced with Short Steel Fibers

ABSTRACT

The present work presents an experimental determination of the value of the energy of a type II fracture in concrete reinforced with short steel fibers (SFRC) based on mixes of normal resistance concrete in Colombia. Behaviors obtained in tube shear tests were compared. Three types of concrete mixtures were elaborated, with the following water/cement ratio: 0.58, 0.50 and 0.40; non-reinforced and reinforced with the following three volume amounts of steel fiber: 0.5%, 1.0% and 2.0%. The specific energy of the type II fracture was estimated based on the cohesive crack model using the fracture work method based on experimental data.

Keywords: Fracture energy, SFRC, fracture mechanics, concrete.

Energia de fratura em modo II do concreto de resistência normal reforçado com fibras curtas de aço

RESUMO

Neste trabalho se determinou experimentalmente o valor da energia de fratura em modo II para concreto reforçado com fibras cortas de aço (SFRC) a partir de misturas de concreto de resistência normal na Colômbia. Compararam-se os comportamentos obtidos para provetas ensaiadas a cortante. Realizaram-se três tipos de misturas de concreto com relações água/cimento: 0,58, 0,50 e 0,40, sem reforço e reforçadas com três quantias volumétricas de fibra de aço: 0,5, 1,0 e 2,0 %. A energia específica de fratura em modo II foi estimada a partir do modelo de fissura coesiva empregando o método de trabalho de fratura a partir dos dados experimentais.

Palavras chave: energia de fratura, SFRC, mecânica de fratura, concreto.

Introducción

La energía de fractura (Griffith, 1924) es un parámetro de interés en la simulación numérica de materiales cuasifrágiles como el concreto, la cerámica y algunas rocas. En el caso del concreto el valor de la energía de fractura depende de las propiedades mecánicas de los materiales constitutivos y de la calidad del mismo. Desde hace varias décadas se ha popularizado la adición de fibras a la matriz de concreto. Estas fibras pueden ser de diferentes materiales, siendo el acero uno de los más comunes y obteniéndose así un material compuesto denominado concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC).

Al incluir las fibras de acero en la mezcla se ven afectadas las propiedades del concreto, tanto en estado fresco (por lo cual se hace necesario cumplir con requisitos adicionales en su preparación) (ACI, 2008), como en estado endurecido, lo que incrementa el desempeño del material por un aumento en la resistencia al cortante y la tracción, así como en la ductilidad, y reduce la fisuración. Sin embargo, quizás uno de los parámetros en los cuales se puede notar un mayor incremento es en la energía específica de fractura G_F (Chuanbo, 2006).

En este trabajo se determina la energía específica de fractura G_F para el SFRC en el modo II (figura 1), a través del modelo de fisura cohesiva (MFC). En el modo II la fractura se presenta con un desplazamiento entre las dos superficies de la fisura en dirección paralela al plano de la misma. Para esto se han empleado los resultados experimentales para una serie de especímenes ensayados a cortante (Segura,

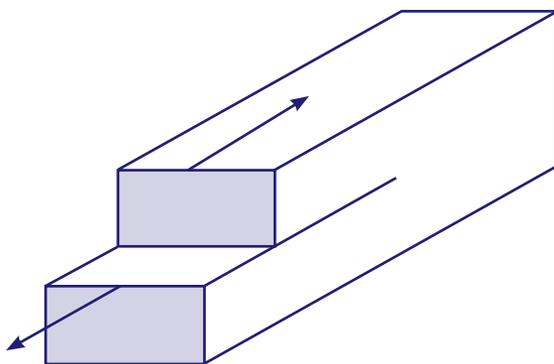


Figura 1. Representación esquemática de la fractura en modo II

Fuente: Arana y González (2002).

2013). Adicionalmente se realizó la comparación de la energía de fractura entre series de especímenes considerando la variación de la relación agua/cemento y la cuantía volumétrica de fibra.

Energía de fractura en cortante

La energía específica de fractura G_F es la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de superficie completamente fisurada y corresponde al área bajo la curva de la función de ablandamiento; sin embargo, el método general para determinar G_F experimentalmente mediante el modelo de fisura cohesiva (MFC) (Barenblatt, 1962) es el de trabajo de fractura o de trabajo total (Hillerborg, 1978).

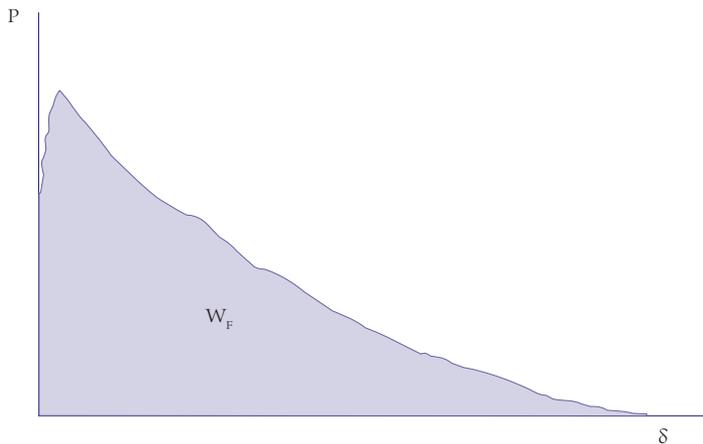


Figura 2. Modelo de fisura cohesiva. Energía de fractura en la curva carga contra desplazamiento

Fuente: elaboración propia

la energía específica de fractura en modo $G_{F_{II}}$ se puede calcular a partir de un ensayo de corte si se determina el trabajo de fractura de acuerdo con la ecuación 1 con base en la curva carga contra desplazamiento de la figura 2 y se divide por el área que liga entre las dos caras de las zonas donde se presente fisura en modo II, usando la ecuación 2.

$$W_F = \int_0^{\delta} P d\delta \quad (1)$$

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad (2)$$

Materiales

Se prepararon mezclas de concreto simple con tres relaciones agua/cemento: 0,40, 0,50 y 0,58, a las cuales se les realizaron adiciones de fibra de acero en cuantías volumétricas de 0,5 % (40 kg/m³), 1,0 % (80 kg/m³) y 2,0 % (160 kg/m³), para un total de 12 dosificaciones incluyendo las de los concretos sin adición de fibras. Debido a que la inclusión de las fibras de acero disminuye sensiblemente la manejabilidad de la mezcla se requirió el uso de superplastificante no reductor de agua que cumpliera con la clasificación de la American Society for Testing and Materials (ASTM) C1017 (ASTM, 2007) tipos I y II. Para la dosificación de las mezclas se aplicaron las recomendaciones de Nataraja, Nagaraj y Basavaraja (2005).

Se usó un tipo de fibra metálica de alta resistencia provista con ganchos de anclaje en sus extremos, clasificada como tipo I de acuerdo con el estándar ASTM A820-11 (ASTM, 2011) y NTC 5214 (Icontec, 2003). La fibra cuenta con una relación de aspecto de 80 y sus principales características se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Ficha técnica de la fibra de acero empleada

DIÁMETRO (d)	0,75 mm ± 0,03 mm
LONGITUD (L)	60 mm ± 0,03
RELACIÓN DE ASPECTO (L/d)	80
SECCIÓN TRANSVERSAL	circular
REFERENCIA COMERCIAL	CHO 80/60
CLASIFICACIÓN NTC 5214	I
RESISTENCIA MÍNIMA TENSIÓN	1100 MPa
ACERO	Crudo, brillante, con bajo contenido de carbono
PRESENTACIÓN	Pegada

Fuente: Imocom Colombia.

Campaña experimental

Para el ensayo de cortante se prepararon viguetas de sección de 150 mm × 150 mm y longitud 600 mm, con entallas de 10 mm de profundidad. En la figura 3 se presenta la geometría y el esquema del montaje de las probetas utilizadas.

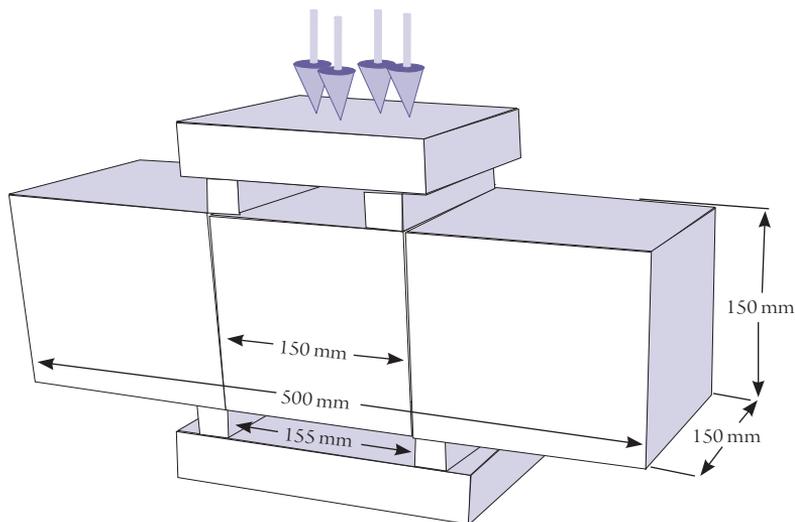


Figura 3. Esquema del montaje para el ensayo de cortante

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente se realizaron ensayos a compresión para caracterizar las mezclas de concreto simple sobre cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Los especímenes se fallaron a una edad mínima de 28 días. En la tabla 2 se presenta un resumen de los ensayos realizados, el estándar usado para su ejecución y los parámetros obtenidos a partir de los mismos.

Tabla 2. Tipos de ensayos realizados

ENSAYO	DIMENSIONES	PARÁMETRO MECÁNICO	PARÁMETRO EN FRACTURA
Compresión simple NTC 673 (Icontec, 2010)	Cilindro: 100 mm × h: 200 mm	f'_c Resistencia a la compresión 28 días	
Cortante JSCE SF-6 (JSCE, 2002)	Vigueta 150 mm × 150 mm x 500 mm	τ Resistencia al cortante	G_{FII}

En total se produjeron 36 probetas para caracterizar la fractura en modo II (tabla 3). La codificación de probetas A, B y C indica la relación a/c 0,50, 0,58 y 0,40, respectivamente; los dígitos subsecuentes representan la cuantía volumétrica de fibra.

Tabla 3. Resumen de las probetas fabricadas

MEZCLA	RF (%)	CILINDROS COMPRESIÓN	VIGUETAS CORTANTE
M.A00	0,0	4	3
M.A05	0,5		3
M.A10	1,0		3
M.A20	2,0		3
M.B00	0,0	4	3
M.B05	0,5		3
M.B10	1,0		3
M.B20	2,0		3
M.C00	0,0	4	3
M.C05	0,5		3
M.C10	1,0		3
M.C20	2,0		3
		12	36

Fuente: elaboración propia.

Los ensayos se realizaron con una máquina universal de ensayos Shimatzu UT-100 A con capacidad de 1000 KN usando la escala para el rango de 0 a 500 KN. La carga aplicada se registró en módulo Winsoft a intervalos de 2 s, mientras que la respuesta local fue medida mediante deformímetros digitales LVDT de 1" de carrera y registrada en el módulo LabView a intervalos de 0,2 s. En la rama ascendente la tasa de aplicación de la carga utilizada fue de 0,5 mm/min y se mantuvo en descarga hasta un 80 % de la carga máxima, a partir de este punto se incrementó a 1 mm/min. En la figura 4 se presentan la instrumentación y la forma de falla para una de las probetas.

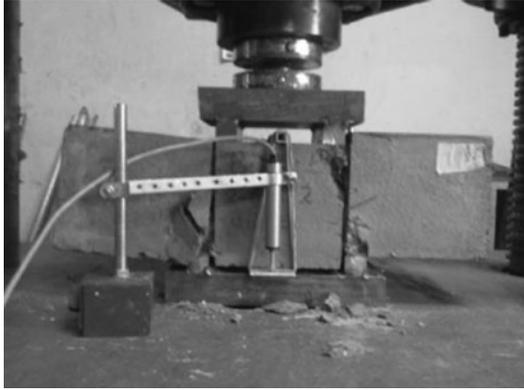


Figura 4. Probeta ensayada a cortante en el momento de la falla

Resultados

En la tabla 4 se presentan los valores promedios de la resistencia a la compresión f'_c , obtenidos a los 28 días, conforme lo establecido en NTC 673 (Icontec, 2010). Los valores entre paréntesis representan la dispersión de la muestra.

Tabla 4. Resistencia a la compresión

MEZCLA	A/C	F'C PROM MPa
B00	0,58	25,4 ($\pm 2,4$)
A00	0,50	27,5 ($\pm 2,6$)
C00	0,40	41,2 ($\pm 4,7$)

Fuente: elaboración propia.

La resistencia al cortante se calculó conforme a lo especificado en la norma JSCE SF-6 (JSCE, 2002) usando la ecuación 3.

$$\tau_{\max} = \frac{Pu}{2 * De * Be} \quad (3)$$

Donde:

Pu = carga máxima alcanzada.

De = altura de la probeta menos la profundidad de la ranura

Be = ancho de la probeta menos la profundidad de la ranura.

En la tabla 5 se presentan los resultados de la resistencia a cortante para cada uno de los grupos de probetas ensayadas y la relación entre dicha resistencia y la resistencia cortante del concreto simple τ/τ_0 .

Tabla 5. Evaluación de resistencia a cortante

RELACIÓN A/C	MEZCLA	PF (%)	TMAX MPA	τ/τ_0
0,580	B	0,0	3,49 ($\pm 0,23$)	1,0
		0,5	5,52 ($\pm 0,27$)	1,6
		1,0	7,51 ($\pm 0,95$)	2,2
		2,0	9,38 ($\pm 0,32$)	2,7
0,500	A	0,0	4,47 ($\pm 0,64$)	1,0
		0,5	6,48 ($\pm 0,64$)	1,4
		1,0	8,9 ($\pm 0,36$)	2,0
		2,0	12,9 ($\pm 0,53$)	2,9
0,400	C	0,0	7,01 ($\pm 0,5$)	1,0
		0,5	8,37 ($\pm 0,6$)	1,2
		1,0	9,64 ($\pm 0,81$)	1,4
		2,0	15,46 ($\pm 0,65$)	2,2

Fuente: elaboración propia.

Se comprobó que la inclusión de fibra metálica incrementa la resistencia al cortante del concreto. La ganancia de resistencia al cortante en las mezclas con $pf = 2,0\%$ está entre 2,2 y 2,9 veces, comparado con las muestras de concreto simple.

La energía de fractura para el modo II se evaluó hasta un desplazamiento en el centro de la probeta, en la dirección de la aplicación de la carga, igual a 5 mm de acuerdo con la ecuación 4.

$$GF_I = \frac{W_F}{Alig} = \frac{W_F}{2(De * Be)} \quad (4)$$

Donde:

W_f = trabajo de fractura calculado como el área bajo la curva P- δ hasta una deflexión de 5 mm.

A_{lig} = área de las dos superficies sobre las que se presenta la fisura.

De y Be = dimensiones efectivas de la probeta descontando la muesca.

En la tabla 6 se resumen los resultados promedio obtenidos para la energía de fractura en modo II calculados para los 12 tipos de mezclas. En la última columna se presenta el incremento de la energía de fractura expresado en función de la energía de fractura del concreto simple.

Se encontró que la energía de fractura presenta un aumento considerable cuando al concreto se le adicionan las fibras cortas de acero, y este comportamiento se incrementa con una mayor cuantía volumétrica de fibras, lo que se traduce en un aumento del desempeño del material en el rango inelástico.

Tabla 6. Evaluación de resistencia y energía de fractura a cortante

RELACIÓN A/C	MEZCLA	PF (%)	GF _{II} N/MM	GF _{II} / GF _{II0}
0,580	B	0,0	0,989 (\pm 1,269)	1,0
		0,5	15,871 (\pm 2,103)	16,0
		1,0	23,997 (\pm 3,859)	24,3
		2,0	33,615 (\pm 4,882)	34,0
0,500	A	0,0	2,889 (\pm 1,396)	1,0
		0,5	17,316 (\pm 1,511)	6,0
		1,0	26,851 (\pm 2,258)	9,3
		2,0	38,604 (\pm 3,875)	13,4
0,400	C	0,0	1,575 (\pm 0,793)	1,0
		0,5	18,392 (\pm 1,745)	11,7
		1,0	28,381 (\pm 4,062)	18,0
		2,0	47,469 (\pm 5,699)	30,1

Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se presentan dos gráficas en las cuales se puede observar el comportamiento de la relación entre la energía de fractura modo II para el SFRC y el concreto simple, en función de la cuantía volumétrica de fibras para cada una de las calidades de la matriz de concreto.

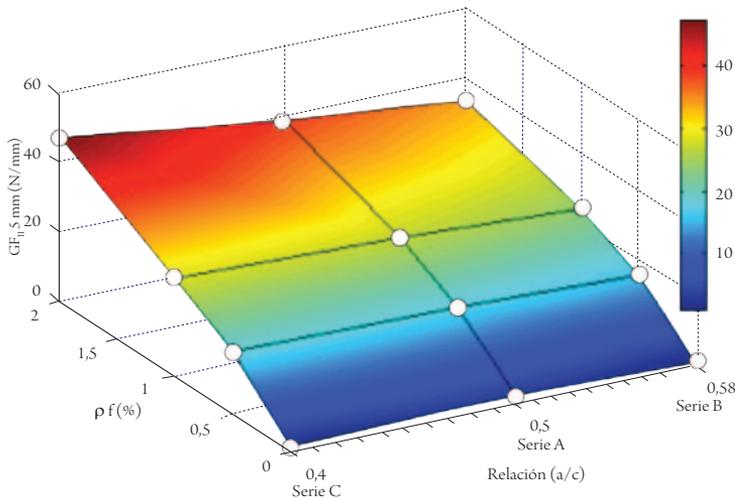
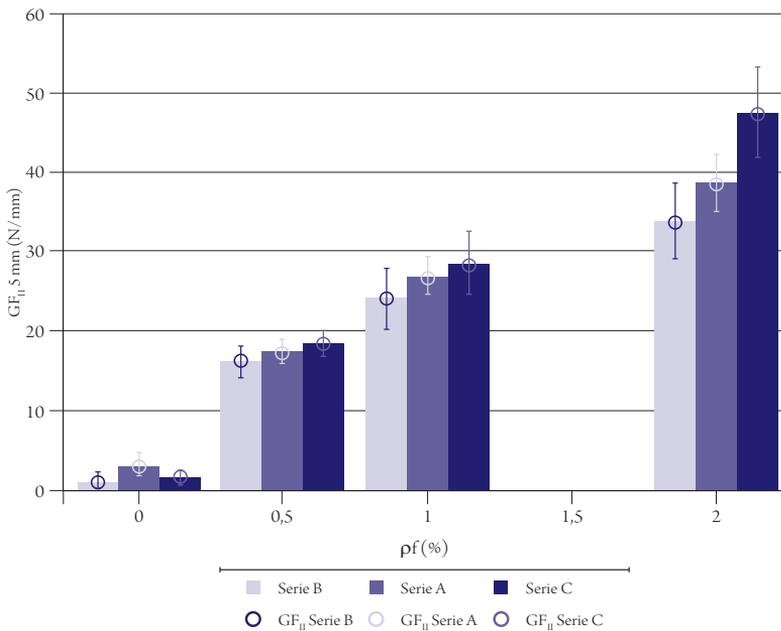


Figura 5. Energía de fractura en función de la resistencia de la matriz de concreto y la cuantía volumétrica de fibras

Conclusiones

El trabajo realizado contribuye a la discusión sobre el uso de fibra metálica como refuerzo para mejorar el desempeño de la matriz de concreto a través de la determinación del parámetro de fractura G_F ; algunas de las conclusiones específicas del trabajo son:

1. Se registraron incrementos de 1,2 a 2,9 veces la resistencia al cortante τ y de 1,2 a 3,8 veces la resistencia a la flexión f_R , con respecto a las muestras de concreto simple, evidenciando la mejora en el desempeño de la mezcla con fibra.
2. La energía específica de fractura G_F en modo II para el SFRC se incrementa cuando la cuantía de fibras adicionadas es mayor.
3. El incremento de G_{FII} en el concreto reforzado con fibras, con respecto al concreto simple, es mucho mayor que el aumento en la resistencia al cortante τ . Los valores de incremento con respecto al concreto simple G_F/G_{F0} en modo II se calcularon entre 6 y 34 veces para los ensayos de flexión.

Referencias

- American Concrete Institute (ACI) (2008). *Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete*. Michigan: Farmington Hills.
- Arana, J. L. y González, J. J. (2002). *Mecánica de fractura*. Bilbao: Universidad del País Vasco. Servicio Editorial.
- Barenblatt, G. I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. En *Advance Applied Mechanics*, 7 (1), 55-129.
- Chuanbo, W. (2006). Experimental Investigation on Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) (thesis of Master). Department of Civil Engineering. University of Canterbury, New Zeland.
- Griffith, A. A. (1924). The theory of rupture. En *Proceedings of the First International Conference of Applied Mechanics*.
- Hillerborg, A. (1978). *A model for fracture analysis*. Lund: Lund Institute of Technology, Division of Building materials.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2000). *Concretos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto*. Tercera actualización. Bogotá D.C.: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2003). *Fibras de acero para refuerzo de concreto*. Primera actualización. Bogotá D.C.: Icontec. NTC 5214.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2010). *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Tercera actualización. Bogotá D.C.: Icontec. NTC 673.
- Irwin, G. R. (1962). Crack-Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate. *Journal of Applied Mechanics*, 29 (4), 651.
- Japan Society Of Civil Engineers (2002). *Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete SFRC*. Tokyo: JSCE.
- Nataraja, M. C., Nagaraj, T. S. y Basavaraja, S. B. (2005). Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance. *Cement and Concrete Research*, 35 (12), 2350-2359.
- Rilem (1985). Draft Recommendation (TC50-FMC). Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams. *Materials and structures*, 18 (4), 287-290.
- Rilem (2002). TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test recommendation final. *Materials and Structures*, 35 (253), 579-582.
- Segura, S. (2013). Determinación de la energía de fractura para concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC) (tesis de maestría en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras). Centro de Estudios de Estructuras y Materiales. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.

