

Evaluación del comportamiento de vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras ante la aplicación de cargas cíclicas

Performance of cantilever reinforced concrete beams with fibers loaded with cyclic forces

Daniel Ruiz¹*, Claudia Ramírez*, Laura Logreira*, María León *

* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 10/08/2014

Fecha de Aceptación: 19/02/2015

PAG 17-31

Resumen

El concreto es un material frágil con poca resistencia a la tensión y que no desarrolla grandes deformaciones en el rango inelástico. Para mejorar estas propiedades mecánicas del concreto, en las últimas décadas se han usado adiciones de fibras en aplicaciones estructurales en Colombia, Suramérica. En este documento los autores presentan el comportamiento mecánico de vigas en voladizo hechas con tres diferentes mezclas de concreto: una de concreto normal y dos con dos diferentes porcentajes de adición de fibras de acero (adiciones de fibras metálicas en una proporción de 15 kg/m³ y 30 kg/m³). Todas las vigas fueron ensayadas con desplazamientos cíclicos que fueron aplicados con un actuador dinámico. Todas las vigas fueron ensayadas para evaluar sus ciclos de histéresis y su capacidad de disipación de energía. Con base en los resultados y para el mismo nivel de desplazamiento, las vigas de concreto reforzado adicionado con fibras disiparon 160% más energía que las elaboradas con concreto reforzado normal. Adicionalmente las fibras metálicas disminuyeron la cantidad y la longitud de las grietas y las fisuras para grandes desplazamientos. Estas características pueden ser benéficas para aplicaciones estructurales específicamente para mejorar el desempeño sísmico de estructuras de concreto.

Palabras claves: Concreto adicionado con fibras metálicas, disipación de energía, ciclos de histéresis, fisuración

Abstract

Conventional non-reinforced concrete is a brittle material with a low tensile strength and low strain capacity. To improve these mechanical properties of concrete, fibers have been used in the last decades in structural engineering applications in Colombia, South America. In this document, the authors present the mechanical behavior of cantilever beams built with three different concrete mixes: one conventional reinforced concrete mix and two steel fiber reinforced concrete mixes with two percentages of metallic fiber addition (15 kg/m³ and 30 kg/m³). The beams were tested with cyclic displacements applied with a dynamic actuator in order to evaluate the hysteresis loops and the energy dissipation capacity. Based on the results, and for the same displacement, the steel fiber reinforced concrete beams dissipates 160 % more energy than conventional reinforced concrete beams. Additionally, metallic fibers reduce the quantity and length of cracks for high displacement levels. These characteristic could be beneficial for structural applications and specifically for improving the seismic performance of concrete structures.

Keywords: Steel fiber reinforced concrete, energy dissipation, hysteresis loops, cracking

1. Introducción y antecedentes

De acuerdo con Meyer (2009) el concreto es uno de los materiales más usados en construcción a nivel mundial, debido a su versatilidad y a su buen desempeño mecánico; lo anterior hace que éste material tenga una importante demanda y que sea objeto de estudio y constante investigación. A pesar de que el concreto presenta buena resistencia a la compresión, es un material frágil y no llega a deformaciones unitarias grandes para altos niveles de esfuerzo. Según Holschemacher et al. (2010), se ha buscado mejorar esta característica mediante algunas adiciones que le permitan al concreto adquirir propiedades que él, por sí solo, no puede desarrollar tanto para concretos convencionales como para concretos de alto desempeño

1. Introduction and background

According to Meyer (2009), concrete is one of the most common building materials at global level, due to its versatility and good mechanical performance; therefore, this material has a high demand and studies and researches thereon are carried out on a regular basis. Although concrete presents good compressive strength, it is a brittle material and does not reach big unit deformations for high stress levels. According to Holschemacher et al. (2010), efforts have been made to improve this characteristic through additions allowing the concrete to obtain properties that it cannot develop on its own, both for conventional concretes and heavy-duty concretes.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Calle 40 No. 5-50 Ed. José Gabriel Maldonado, S.J., Bogotá, Colombia.

E-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co



Según Marmol (2010), la adición de fibras en materiales como el ladrillo y el mortero, se ha realizado desde décadas atrás, pero los primeros adelantos que se conocen con certeza en este tema, fueron los realizados por Graham en 1911 cuando implementó por primera vez las fibras de acero para mejorar las características del concreto. Posteriormente; y de acuerdo con lo reportado por Marmol (2010); se registran estudios científicos en este tema, realizados por Griffith en 1920 y por Romualdi, en 1963.

De acuerdo con Nataraja et al. (2000) el concreto adicionado con fibras metálicas se caracteriza por ser capaz de soportar esfuerzos, incluso después de que la matriz de concreto llega a la falla; esto gracias a que las fibras mantienen unida dicha matriz de forma residual, haciendo posible que siga soportando esfuerzos después de haber alcanzado la resistencia máxima. Este comportamiento del concreto es muy deseado en las estructuras, especialmente en aquellas que están ubicadas en zonas de riesgo sísmico.

Las fibras metálicas son de acero y tienen usualmente una relación entre la longitud y el diámetro que varía entre 20 y 100. Por funcionalidad, geometría y dosificación se clasifican en microfibras y macrofibras. Las microfibras evitan la fisuración del concreto en estado fresco y se dosifican en porcentajes de volumen entre el 0.03 y 0.15%, mientras que las macrofibras previenen la fisuración en estado endurecido, y su dosificación varía entre el 0.2 y 0.8% en volumen. La resistencia a la compresión se incrementa poco con la adición de fibras metálicas al comparar dicho efecto con el incremento que tiene la tenacidad con el mismo porcentaje de adición. No obstante, la literatura técnica y científica es bastante variable en cuanto al real incremento en resistencia a la compresión al adicionar fibras metálicas; ya que algunos autores como Ding y Kusterle (1999) afirmaron que el incremento en resistencia a la compresión es despreciable; y otros autores como Alfonso y Badillo (2011) reportan incrementos en resistencia a la compresión superiores al 20%.

Por otro lado, el anclaje de las fibras metálicas en la matriz de concreto incrementa la tenacidad del material, ya que las fibras ayudan a resistir el agrietamiento. El estudio Holschemacher et al. (2010) demostró que el comportamiento de las fibras como adición al concreto, depende de su dosificación y dimensionamiento y comprobó que las fibras metálicas mejoran el comportamiento a flexión y la disipación de energía.

No obstante, no abundan investigaciones en la literatura técnica y científica relacionadas con el desempeño del concreto adicionado con fibras ante eventos sísmicos. Dentro de los estudios encontrados en revistas científicas en donde se aborda el comportamiento sísmico (o cíclico) de concreto con fibras se destacan los reportados por K. Ramadevi et al. (2013); G. Kotsovos et al. (2007); Buyle-Bodin, F. y Madhkhan, M., (2002); Dora y Hamid (2012); Ganesan N. et al. (2007); Shakya K. et al. (2012); Shannag M. et al. (2005) y Sreeja M.D. (2013).

As stated by Marmol (2010), fiber addition in materials such as brick and mortar has been made for decades, but the first breakthrough on this matter was made by Graham in 1911, when he implemented steel fibers to improve the characteristics of concrete. Subsequently, and as reported by Marmol (2010), scientific studies on this subject were undertaken by Griffith in 1920 and Romualdi in 1963.

According to Nataraja et al. (2000), the characteristic of metallic fiber reinforced concrete is its capacity to resist stresses, even after a failure occurs in the concrete matrix; the reason is that fibers keep this matrix residually bonded, so that it can further resist stresses even after reaching the maximum strength. This behavior of concrete is highly desirable for structures, especially those located in seismic risk zones.

Metallic fibers are made of steel and they usually have a length to diameter ratio between 20 and 100. For functionality, geometry and proportioning reasons, they are classified in microfibras and macrofibras. Microfibras prevent cracking of fresh concrete and they are proportioned in volume percentages between 0.03 and 0.15%, while macrofibras prevent cracking of hardened concrete, and its proportioning varies between 0.2 and 0.8%. The compressive strength does not increase much with the metallic fiber addition, when comparing this effect with the toughness increase achieved with the same addition percentage. However, the technical and scientific literature is quite variable in relation to the real compressive strength increase when adding metallic fibers; some authors like Ding and Kusterle (1999) have stated that the compressive strength increase is insignificant; other authors, like Alfonso and Badillo (2011) have reported compressive strength increases over 20%.

On the other hand, the anchorage of metallic fibers in the concrete matrix increases the material's toughness, since fibers help to resist cracking. The study of Holschemacher et al. (2010) demonstrated that the behavior of fibers added to concrete depends on the proportioning and dimensioning and proved that metallic fibers improve the flexural behavior and energy dissipation.

Nevertheless, there are not many researches in the technical and scientific literature regarding the performance of concrete with fiber addition in the face of seismic events. Among the studies available in scientific reviews dealing with the seismic (or cyclic) behavior of concrete with fibers, we can highlight those reported by K. Ramadevi et al. (2013); G. Kotsovos et al. (2007); Buyle-Bodin, F. and Madhkhan, M., (2002); Dora and Hamid (2012); Ganesan N. et al. (2007); Shakya, K. et al. (2012); Shannag M. et al. (2005) and Sreeja M.D. (2013).



En Buyle-Bodin y Madhkhan (2002) se elaboraron elementos estructurales (columnas sometidas simultáneamente a flexión con carga cíclica y carga axial constante) con cuantías de fibras metálicas de 20 y 40 kg/m³, los cuales fueron sometidos a cargas axiales y a cargas cíclicas. El objetivo de este estudio fue evaluar la posibilidad de sustituir el acero de refuerzo convencional, por las fibras metálicas únicamente. De este estudio se concluyó que dicho reemplazo era viable, pero en los lugares donde el elemento estaba sometido a mayores esfuerzos, era necesario el uso de acero de refuerzo convencional adicional.

En la referencia Shakya *et al.* (2012) se evaluó la posibilidad de reducir el acero de refuerzo en los nodos, con el fin de evitar la congestión en las uniones de puentes de ferrocarril, para lo cual se elaboraron tres especímenes a escala 1:6 de una unión viga-columna. Los modelos a escala fueron ensayados bajo cargas cíclicas con desplazamientos controlados. La diferencia entre los tres especímenes radicaba en que uno no tenía fibras metálicas y los otros dos tenían porcentajes de adición del 1% y 1.5% del volumen de concreto. A pesar de que la reducción de las varillas en las columnas debilita el efecto de confinamiento y hace que las fisuras en los nodos aparezcan más rápidamente, se observó que para las probetas con adiciones de fibras metálicas, el número de fisuras y su propagación fue mucho menor que en la que no tenía adición.

En Ioan (1992) se reporta también una investigación acerca del comportamiento de las uniones viga columna. Se elaboraron un total de cuatro especímenes a escala real de las uniones de pórticos de concreto. Dos de los especímenes estaban elaborados con concreto convencional y otros dos especímenes tenían concreto adicionado con fibras metálicas en los nodos. Para estos últimos especímenes se realizó una reducción de los flejes en la unión. Los especímenes fueron sometidos a cargas cíclicas pseudo dinámicas obteniendo los ciclos de histéresis y se concluyó que las probetas con adición de fibras metálicas presentaron una capacidad de carga superior en un 60%. Resultados similares se reportaron en Dora y Hamid (2012).

Varios estudios a nivel colombiano se han realizado acerca del comportamiento mecánico del concreto con adiciones de fibras metálicas como lo reportado por Alfonso y Badillo (2011) o el estudio de Cardona (2010). De la misma manera las principales aplicaciones que se han hecho en Colombia han estado vinculadas sobre todo a túneles y a pisos industriales. Sin embargo, en Colombia su utilización en pórticos de concreto reforzado no ha sido muy explorada.

Este hecho hace que sea muy pertinente desarrollar investigaciones de este tipo en Colombia ya que es de esperarse que las fibras mejoren la capacidad de disipación de energía de los sistemas aportados y en consecuencia estas adiciones al concreto puedan aumentar tanto el coeficiente de reducción de la fuerza sísmica (R) como el amortiguamiento sísmico histerético equivalente. El presente documento intenta disminuir la brecha del conocimiento en elementos de concreto reforzado con adiciones de fibras sometidos a cargas cíclicas. Específicamente se busca establecer la evolución del daño y la disipación de energía en función del desplazamiento lateral.

In Buyle-Bodin and Madhkhan (2002), structural members were elaborated (columns simultaneously subjected to flexural cyclic loading and constant axial load) with metallic fiber quantities of 20 and 40 kg/m³, which were subjected to axial loads and cyclic loading. The purpose of this study was to evaluate the possibility of replacing the conventional reinforced steel solely by metallic fibers. This study allowed to conclude that the replacement was viable, but in the places where the member was subjected to higher stresses it was necessary to use additional conventional reinforced steel.

In the reference Shakya et al. (2012), the possibility of reducing reinforced steel in the nodes was assessed, with the aim of preventing steel accumulation at the joints of railway bridges; therefore, three test specimens were prepared on a 1:6 scale of a beam-column joint. Scale models were tested under cyclic loadings with controlled displacements. The difference between the three test specimens was that one had no metallic fibers and the other two had addition percentages of 1% and 1.5% of the concrete volume. Although the rod reduction in the columns weakens the confinement effect and cracks appear more rapidly in the nodes, it was observed that cylinders with metallic fiber addition presented a much lower number of cracks and spreading was far less than in cylinders without addition.

Ioan (1992) also reports a research dealing with the behaviors of the beam-column joints. A total of four test specimens of concrete frame joints were prepared on a real-size scale. Two specimens were prepared with conventional concrete and the other two used concrete with metallic fiber addition in the nodes. In the two latter specimens, flanges were reduced in the joint. Test specimens were subjected to pseudo-dynamic cyclic loading thereby obtaining the hysteresis loops, and it was concluded that specimens with metallic fiber addition presented a 60% higher load capacity. Similar results were reported in Dora and Hamid (2012).

Several studies in Colombia have been related with the mechanical behavior of metallic fiber reinforced concrete, as reported by Alfonso and Badillo (2011) or the study of Cardona (2010). Likewise, the main applications in Colombia have been related mostly to tunnels and industrial floors. However, its use in reinforced concrete frames has not been much investigated in Colombia.

This fact calls for the development of this kind of research in Colombia, since it is to be expected that fibers will improve the energy dissipation capacity of framed systems and, consequently, these concrete additions may increase both the seismic force reduction coefficient (R) and the equivalent seismic-hysteretic damping. The present document intends to reduce the knowledge gap regarding concrete members reinforced with fiber additions under cyclic loading. Specifically, the aim is to follow the evolution of damage and energy dissipation in relation to lateral displacement.



2. Metodología

Con base en lo anterior se estableció una metodología para la evaluación del comportamiento cíclico (seudodinámico) de elementos de concreto reforzado con adición de fibras metálicas con miras a futuras aplicaciones en pórticos de concreto reforzado ante acciones sísmicas:

Se elaboraron diferentes especímenes con el fin de caracterizar el material y de evaluar la capacidad de disipación de energía del concreto reforzado adicionado con fibras metálicas. Dichos especímenes se realizaron con 3 diferentes tipos de mezclas, los cuales se diferenciaban entre sí por el porcentaje de adición de fibras metálicas. La primera mezcla (CC) consistía en un concreto convencional, sin ningún tipo de adición; y se elaboraron especímenes con esta mezcla con el fin de realizar comparaciones entre el material con y sin fibras metálicas. Una segunda mezcla (CF1), tenía un contenido total de 15 kg/m³ de fibras metálicas y la tercera (CF2) contaba con una adición de 30 kg/m³ de las mismas.

Las fibras metálicas usadas fueron suministradas por una empresa del sector productivo elaboradas en acero formado en frío con ganchos doblados en los extremos para un óptimo anclaje. La longitud total de cada fibra era de 60 mm y su diámetro de 0.9 mm (Ver Figura 1). La resistencia nominal a la tracción del material de las fibras era de 1160 N/mm² y un módulo de elasticidad de 210000 N/mm².

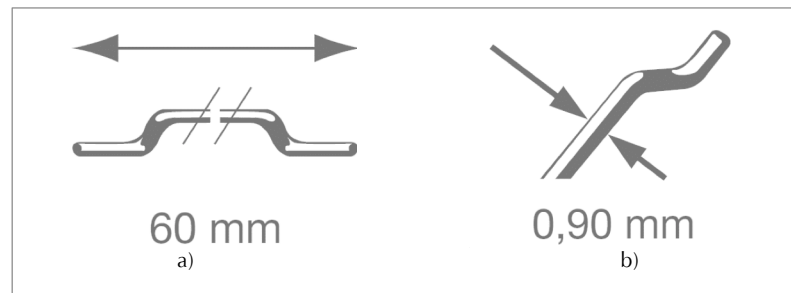


Figura 1. a) Longitud típica de la fibra b) Diámetro de cada fibra
Figure 1. a) Typical length of the fiber and b) Diameter of each fiber

El diseño de mezcla utilizado para la elaboración de todas las probetas, fue suministrado por una importante concretera del sector productivo de la construcción; con una resistencia de diseño del concreto convencional (sin fibras) a los 28 días de 21 MPa. Dichos diseños utilizados se resumen en la Tabla 1. Es importante mencionar que en el diseño de mezcla se usaron dos aditivos con efectos de superplastificantes y reductores de agua. Se escogieron adiciones de 15 y 30 kg/m³ debido a que son las comúnmente utilizadas en Colombia (aunque en otras aplicaciones) y están en el orden de magnitud de las usadas en varias de las referencias consultadas.

2. Methodology

Based on the above, a methodology was established to evaluate the cyclic (pseudo-dynamic) behavior of metallic fiber reinforced concrete members considering future applications in reinforced concrete frames in the face of seismic actions:

Different test specimens were prepared with the purpose of characterizing the material and evaluating the energy dissipation capacity of the concrete reinforced with metallic fiber addition. These specimens were prepared with three different types of mixes, which were differentiated by the percentage of metallic fiber addition. The first mix (CC) was conventional concrete, with no addition whatsoever; specimens were elaborated with this mix in order to make comparisons between the material with and without metallic fibers. A second mix (FC1) contained a total of 15 kg/m³ of metallic fibers, and the third one (FC2) contained 30 kg/m³ of metallic fibers addition.

The metallic fibers were supplied by a company from the productive sector, and they were manufactured in cold-formed steel, with hooks bended in the ends for optimal anchorage. The total length of each fiber was 60 mm with a diameter of 0.9 mm (see Figure 1). The nominal tensile strength of the fiber material was 1,160 N/mm² and a modulus of elasticity of 210000 N/mm².

The mix design used in all cylinders was supplied by an important concrete manufacturer of the construction productive sector; with a design resistance of conventional concrete (without fibers) at 28 days of 21 MPa. Table 1 summarize the designs. It is important to mention that in the mix design two additions with superplasticizers and water reducing effects were used. Additions of 15 and 30 kg/m³ were chosen, because they are the most commonly used in Colombia (although in different applications), and they are in the order of magnitude of those used in several consulted references.

Tabla 1. Diseños de mezcla utilizados

Table 1. Mix Designs

	TIPO DE MEZCLA/ TYPE OF MIX		
	CC	CF1/FC1	CF2/FC2
Cemento/ Cement (kg)	49.20	53.03	53.04
Agua (litros)/ Water (liters)	23.95	25.82	25.82
Grava/Gravel (kg)	136.32	146.92	146.93
Arena/Sand (kg)	125.32	135.06	135.07
Aditivo 1/Addition 1 (ml)*	236.60	255.00	255.01
Aditivo 2/ Addition 2 (ml)**	285.52	307.71	307.72
Fibras metálicas/ Metallic fibers (kg)	0	2.34	4.68

*Aditivo 1: Superplastificante (Reductor de agua de Rango Alto)/ *Addition 1: Superplasticizer (High-range water reducer)
**Aditivo 2: Poliufuncional (Plastificante - Reductor de agua)/ **Addition 2: Polyfunctional (Plasticizer - Water reducer)

Con el fin de caracterizar el material, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión según ICONTEC (2010) y de módulo de elasticidad según ICONTEC (2006); para esto, se elaboraron 9 cilindros, 3 para cada tipo de mezcla. Para evaluar la tenacidad del concreto con el que se realizarían todos los ensayos, se llevaron a cabo 4 ensayos de resistencia flexural para lo cual se elaboraron 4 viguetas, 2 con la mezcla (CF1) y las otras 2 con la mezcla (CF2). Estas viguetas se fallaron siguiendo la referencia EFNARC (1996). En la Tabla 2 se presentan las pruebas de caracterización mecánica de las mezclas de concreto evaluadas.

With the purpose of characterizing the material, compressive strength tests were carried out according to ICONTEC (2010) and modulus of elasticity tests were performed according to ICONTEC (2006); therefore, 9 cylinders were prepared, 3 for each type of mix. In order to evaluate the toughness of the concrete to be used in all tests, 4 flexural strength tests were carried out, for which 4 joists were made, 2 with the (FC1) mix and the other two with the (FC2) mix. These beams were tested following the reference EFNARC (1996). Table 2 presents the mechanical tests of the evaluated concrete mixes.

Tabla 2. Resultados de pruebas de caracterización mecánica de las mezclas de concreto evaluadas

Table 2. Results of the mechanical tests for the evaluated concrete mixes

	TIPO DE MEZCLA/ TYPE OF MIX				
	CC	CF1/FC1		CF2/FC2	
Cilindros (NTC 673 y NTC 4025)/ Cylinders (NTC 673 and NTC 4025)	3	3		3	
Viguetas (EFNARC)/ Joists (EFNARC)	NA	2		2	
Vigas en voladizo/ Cantilever Beams	2	2		2	
Resistencia a la compresión (MPa) (Norma NTC 673)/ Compressive Strength (MPa) (Standard NTC 673)	21.75	24.36		27.45	
Módulo de elasticidad (MPa) (Norma NTC 4025)/ Modulus of Elasticity (MPa) (Standard NTC 4025)	16462	16754		20205	
PROBETA TIPO/ CYLINDER TYPE	----	CF1-1/ FC1-1	CF1-2/ FC1-2	CF2-1/ FC2-1	CF2-2/ FC2-2
Carga Máxima según Norma EFNARC (kN)/ Maximum Load according to EFNARC Standard (kN)	----	29.46	29.40	29.75	29.66
Resistencia Flexural según EFNARC (MPa)/ Flexural Strength according to EFNARC (MPa)	----	4.36	4.36	4.41	4.39

Adicionalmente se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para determinar la finura del cemento hidráulico usado mediante la referencia ICONTEC (1997). El valor medio de las 5 pruebas realizadas fue 3774 cm²/g.

Una vez terminado el proceso de caracterización del material, se llevaron a cabo 6 ensayos con carga pseudo dinámica en elementos de concreto reforzado (2 para cada tipo de mezcla). Para estos ensayos se elaboraron vigas en voladizo, las cuales fueron predimensionadas teniendo en cuenta las cargas que se iba a aplicar en los ensayos y las condiciones generales del actuador dinámico y del marco de reacción. Para el diseño experimental se usaron modelos por fibras mediante el software Xtract (diagramas Momento vs.

Additionally, laboratory tests were performed to determine the fineness of the hydraulic cement based on the ICONTEC (1997) reference. The average value of the 5 tests undertaken was 3774 cm²/g.

Once the characterization process of the material was over, 6 tests were carried out with pseudo-dynamic loading in reinforced concrete members (2 for each type of mix). For these tests, cantilever beams were built, which were pre-dimensioned considering the loads applied during the tests and the general conditions of the dynamic actuator and the reaction frame. For the experimental design, fiber models were used through the Xtract Software (Moment vs.



Curvatura y Momento vs. Rotación) de acuerdo con la referencia Imbsen & Chadwell (2005) y siguiendo el reglamento de diseño sismo resistente de la referencia AIS (2010). En la Figura 2a) se muestran las dimensiones de las vigas y en Figura 2b) se muestra la ubicación y el tipo de barras de acero de refuerzo.

Curvature and Moment vs. Rotation diagrams), according to the reference of Imbsen and Chadwell (2005), and following the earthquake-resistant design regulation of the reference AIS (2010). Figure 2a) shows the dimensions of the beams and Figure 2b) shows the location and the type of reinforcing steel bars.

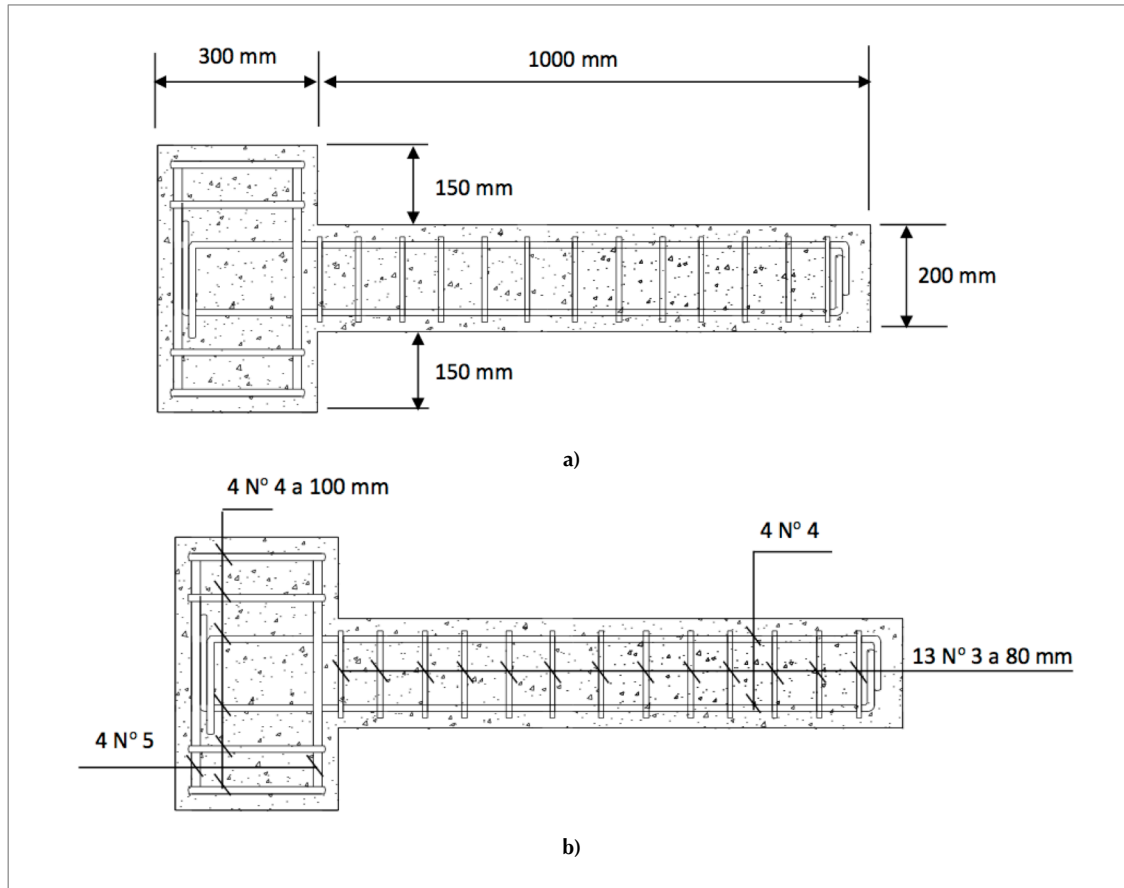


Figura 2. Geometría de las vigas en voladizo ensayadas b) Despiece de las vigas en voladizo ensayadas
Figure 2. Geometry of the tested cantilever beams and b) Detailed representation of the tested cantilever beams

En los ensayos pseudo dinámicos se aplicaron desplazamientos cíclicos controlados (sinusoidales) a la parte superior de las vigas en voladizo como se muestra en la Figura 3a. Los desplazamientos iniciaron en desplazamientos pequeños hasta llegar a niveles de distorsión cercanos al 6% de la longitud de las probetas. Por su parte en las Figuras 3b) y 3c) se muestra un esquema y una fotografía del montaje experimental de los ensayos de laboratorio. Este montaje y método de ensayos es similar al de Ganesa N. et al. (2007) aunque para el presente caso se realizaron mayor cantidad de ciclos por nivel de desplazamiento y con mayor cantidad de datos adquiridos; como consecuencia del uso de equipos de mayor tecnología.

In the pseudo-dynamic tests, controlled cyclic (sinusoidal) displacements were applied to the upper part of the cantilever beams, as shown in Figure 3a). Displacements were small at first, until reaching distortion levels close to 6% of the joists' length. On the other hand, Figures 3b) and 3c) show a drawing and a photograph of the experimental assembly of the laboratory tests. This test assembly and method is similar to that of Ganesa N. et al. (2007), although in this case, a larger number of cycles per displacement level were performed and a greater amount of data was available as a consequence of using more technological equipment.

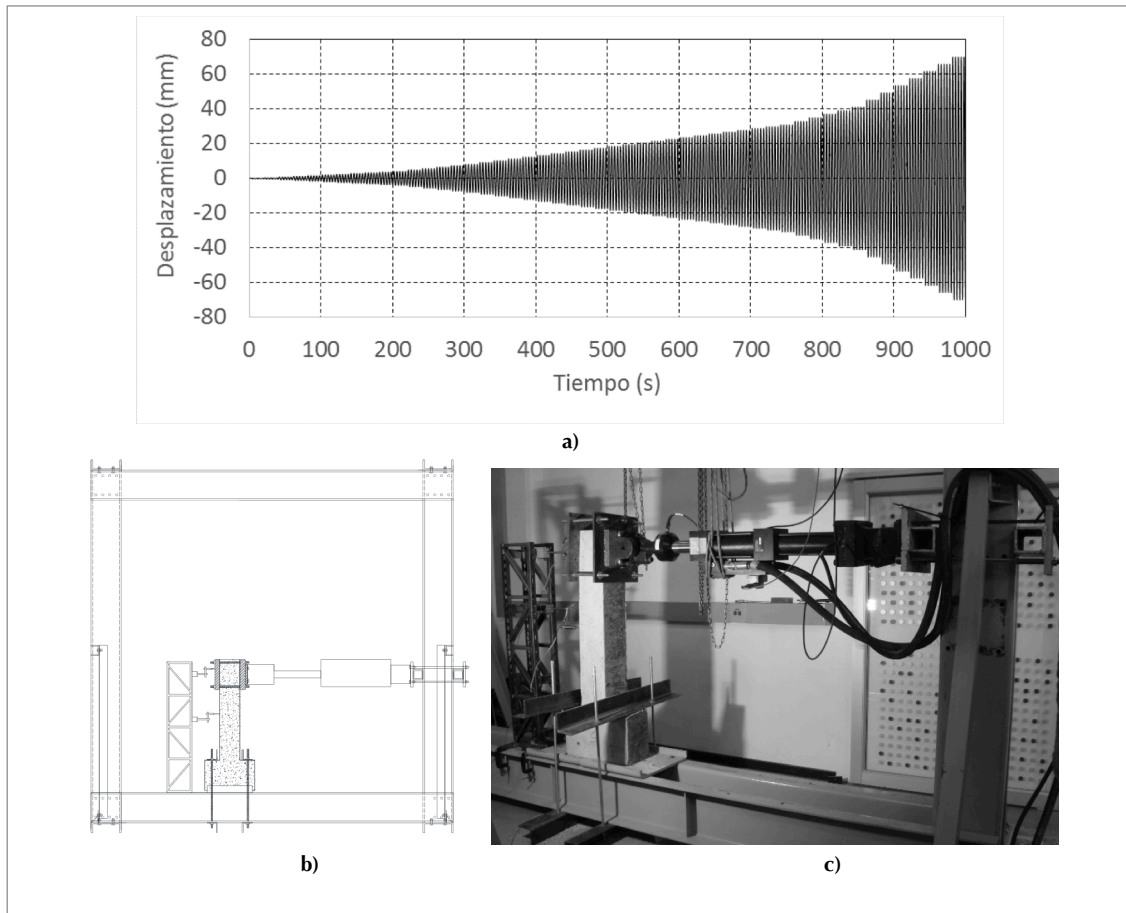


Figura 3. a) Historia de desplazamientos sinusoidales controlados aplicados en el extremo libre de las vigas en voladizo ensayadas b) Esquema del montaje experimental c) Fotografía de un ensayo seudo dinámico en ejecución
Figure 3. a) History of controlled sinusoidal displacements applied in the free end of the tested cantilever beams b) Drawing of the experimental assembly c) Photograph of a running pseudo-dynamic test

Los desplazamientos de la Figura 3a) fueron inducidas por el actuador dinámico MTS del Laboratorio de Estructuras del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana a una frecuencia de 3 ciclos (carga-descarga) por minuto. Adicionalmente se instrumentó cada viga con deformímetros electrónicos tipo LVDT (a media altura y en la altura total), con el fin de registrar los desplazamientos de las probetas con respecto al tiempo. Este procedimiento se realizó para las 6 probetas construidas con los diferentes tipos de mezclas, hasta llevarlas a la falla a niveles de deriva cercanos al 6%. Este nivel de falla y de deriva se determinó mediante modelos numéricos no lineales del concreto (usando diagramas momento curvatura por el método de fibras); y el objetivo de las pruebas fue llevar el giro plástico de la sección transversal a niveles de rotación superiores al de seguridad a la vida (LS) y cercanos al nivel de colapso (C) según lo definido en ATC (1996).

Una vez realizados los ensayos, se calcularon los ciclos de histéresis de los elementos de concreto reforzado ensayados evaluando la energía disipada en cada ciclo para diferentes niveles de desplazamiento.

The displacements in Figure 3a) were induced by the MTS dynamic actuator of the Structures Laboratory of the Laboratory of Tests and Trials of the Pontificia Universidad Javeriana at a frequency of 3 cycles per minute (load-unload). Additionally, each beam was supplied with LVDT-type electronic transducers (at mid height and total height), with the aim of recording the displacements of the joists in relation to time. This procedure was carried out for all 6 joists built with the different types of mixes, until bringing them to failure at drift levels close to 6%. This failure and drift level was determined through non-linear numerical models of concrete (using moment vs curvature diagrams by the fiber method); and the objective of the tests was to take the plastic hinge of the cross-section to rotation levels higher than the Life Safety level (LS) and close to the Collapse level (C), according to the definitions contained in ATC (1996).

After the tests, the hysteresis cycles of the tested reinforced concrete members were calculated by assessing the dissipated energy in each cycle for different displacement levels.

3. Resultados y discusión

3.1 Ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

Los ensayos de resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad dieron como resultado los valores mostrados en la Tabla 2. Como se puede observar, la mezcla que presentó mayor resistencia a la compresión fue CF2, seguida por la mezcla CF1 y finalmente la mezcla CC. Lo anterior indica que para la mezcla CF2 se presentó un incremento en la resistencia del 26%, mientras que en el caso de la mezcla CF1 el incremento fue del 11%, con respecto a la mezcla de concreto convencional.

Para los ensayos de módulo de elasticidad, se registraron valores similares para las mezclas de CC y CF1, mientras que para las probetas elaboradas con la mezcla CF2 se obtuvo un módulo de elasticidad notablemente mayor que el de las otras mezclas de concreto. Tanto para los ensayos de resistencia a la compresión, como para los de módulo de elasticidad, la mezcla de concreto que presentó mejor desempeño fue CF2, que corresponde a la mezcla con adición de 30 kg/m³ de fibras metálicas.

3.2 Ensayos de resistencia flexural

Para el cálculo de la resistencia flexural y con base en la norma EFNARC (1996), se determinaron las curvas de carga-deflexión. Con respecto a la recta ajustada a la curva de tendencia del tramo lineal inicial, se traza una línea paralela desplazada 0.1 mm en el eje de la deflexión. La intersección de la línea paralela a la parte recta de la curva y la curva carga deflexión corresponde a la primera carga máxima ($P_{0,1}$), este valor es utilizado para hallar el valor de la resistencia flexural, la cual se calcula como una resistencia elástica a la tracción equivalente.

En las Figuras 4a) y 4b) se pueden observar las curvas carga-deflexión para cada uno de los especímenes elaborados de acuerdo con la norma EFNARC cuyo montaje típico se muestra en la Figura 4c). Una vez obtenidas las cargas máximas $P_{0,1}$, se calculó la resistencia flexural de cada una de las probetas dando como resultado los datos que se exponen en la Tabla 2.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia flexural es posible afirmar que aunque todas las probetas alcanzaron una carga a flexión máxima similar, la mezcla CF1 presenta una disminución de la resistencia más marcada que la mezcla CF2, lo cual indica que la mezcla CF1 posee una resistencia residual en promedio más baja que la mezcla CF2. Esto implica que la mezcla CF2 es capaz de disipar más energía después de que el material alcance la carga máxima (falla inicial). A manera de ejemplo a los 4 mm de desplazamiento la resistencia residual promedio de las probetas hechas con la mezcla CF1 es de 2.2 MPa, mientras que las hechas con la mezcla CF2 tiene una resistencia residual de 3.1 MPa para el mismo desplazamiento.

Como se muestra en la Figura 4d) las fibras metálicas no fallaron, algunas se desprendieron de la matriz de concreto pero la mayoría quedaron ancladas, retrasando el crecimiento de las fisuras y aportando tenacidad al material.

3. Results and discussion

3.1 Compressive strength and modulus of elasticity tests

Table 2 shows the values of the compressive strength and modulus of elasticity tests. It can be observed that the mix presenting the highest compressive strength is FC2, followed by the FC1 mix, and finally, the CC mix. This indicates that the FC2 mix presented 26% strength increase, while for the FC1 mix the increase was 11%, in relation to the conventional concrete mix.

For the modulus of elasticity tests, similar values were reported for the CC and FC1 mixes, while the joists built with the FC2 mix reported a modulus of elasticity significantly higher than the two other concrete mixes. In the compressive strength test, as well as in the modulus of elasticity test, the concrete mix showing the best performance was the FC2 mix, which had a 30 kg/m³ addition of metallic fibers.

3.2 Flexural strength tests

The load-deflection curves were determined for the calculation of the flexural strength, based on the EFNARC standard (1996). With regard to the straight line adjusted to the trend curve of the initial linear segment, a parallel line is drawn which is displaced 0.1 mm in the axis of the deflection. The intersection of the line parallel to the straight part of the curve and the load-deflection curve correspond to the first maximum load ($P_{0,1}$); this value is used to find the flexural strength value, which is calculated as an elastic strength to the equivalent traction.

Figures 4a) and 4b) show the load-deflection curves for each specimen according to the EFNARC standard, whose typical assembly is shown in Figure 4c). Once the maximum loads $P_{0,1}$ were obtained, the flexural strength was calculated for each joist, and the resulting data are indicated in Table 2.

Based on the results obtained in the flexural strength tests, it is possible to state that, although all cylinders reached a similar maximum flexural loading, the FC1 mix presents a more pronounced strength reduction than the FC2 mix, which indicates that the FC1 mix has a residual strength that is on average lower than the FC2 mix. This implies that the FC2 mix is capable of dissipating more energy once the material reaches the maximum load (initial failure). For example, at a 4 mm displacement, the average residual strength of the cylinders built with the FC1 mix is 2.2 MPa, while those built with the FC2 mix have a residual strength of 3.1 MPa for the same displacement.

As shown in Figure 4d), metallic fibers did not fail, some were detached from the concrete matrix, but most of them remained anchored, thus delaying the growth of cracks and providing toughness to the material.



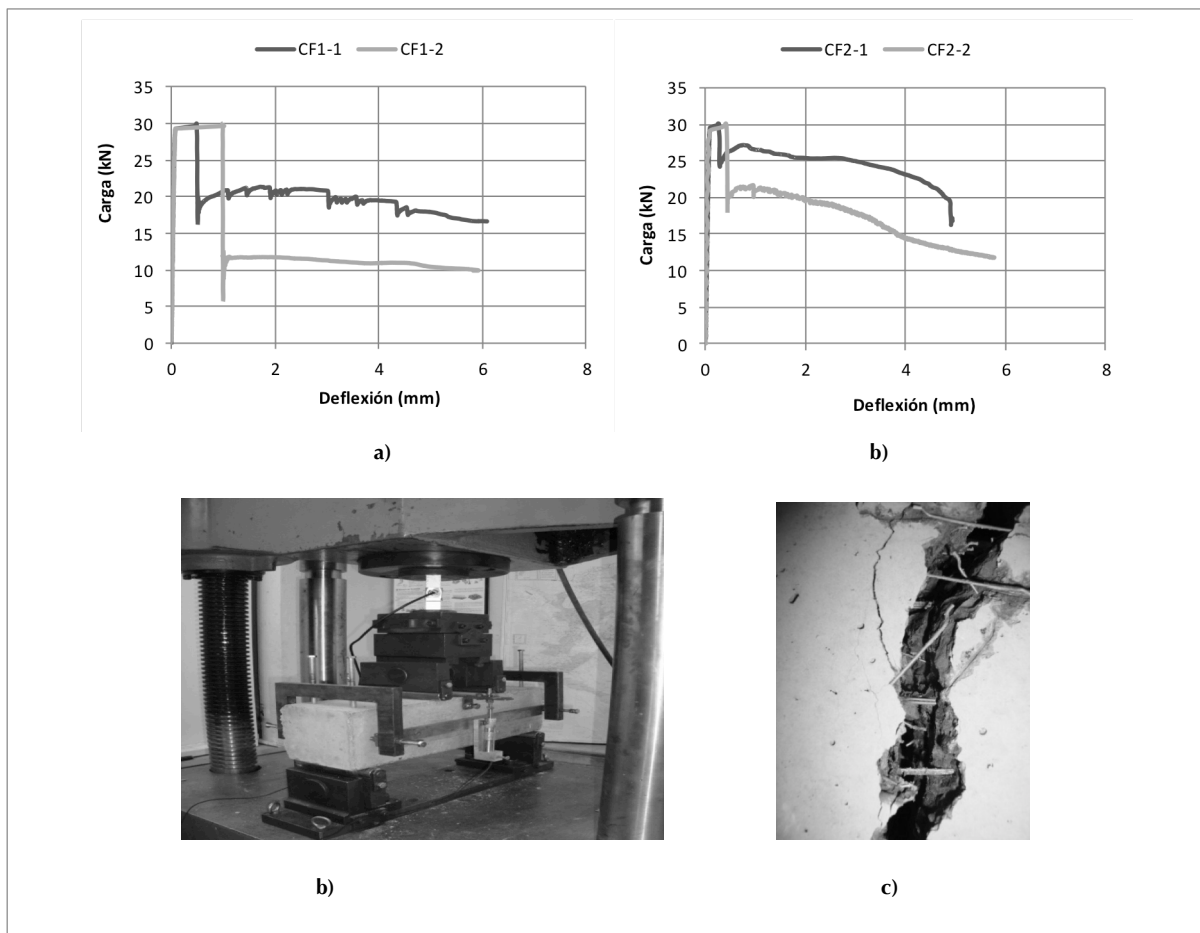


Figura 4. a) Ensayos de resistencia Flexural para la mezcla CF1, b) Ensayos de resistencia Flexural para la mezcla CF2, c) Montaje experimental del ensayo según la norma EFNARC (1996), d) Detalle del estado de las fibras en una de las fisuras de las probetas ensayadas

Figure 4. a) Flexural strength tests for the FC1 mix, b) Flexural strength tests for the FC2 mix, c) Experimental test assembly according to the EFNARC standard (1996), d) Detail of the fiber condition in one of the cracks of the tested cylinders.

3.3 Ensayos seudo dinámicos sobre vigas en voladizo

Los datos arrojados por los ensayos seudo dinámicos, dieron como resultado los ciclos de histéresis mostrados en la Figura 5. A pesar de que el objetivo de la investigación no estaba centrado en evaluar el incremento en resistencia a la flexión del concreto con fibras, en la Figura 5 se evidenció que los valores de resistencia máxima de las probetas elaboradas con la mezcla CC y con la mezcla CF1 son similares, mientras que la resistencia de las vigas hechas con la mezcla CF2 es un 14.7 % superior (en promedio). El objetivo de la investigación se centró en la evaluación de la energía disipada por cada una de las mezclas. Por ello se calculó dicha energía mediante el área al interior de los ciclos de histéresis de acuerdo con lo recomendado en la referencia ATC40 (1996), la cual fue desarrollada para metodologías no lineales estáticas.

3.3 Pseudo-dynamic tests on cantilever beams

Figure 5 shows the hysteresis cycles resulting from data obtained in the pseudo-dynamic tests. Despite the fact that the objective of the research was not focused on evaluating the flexural strength increase of fiber reinforced concrete, Figure 5 evidences similar maximum strength values for cylinders built with the CC mix and the FC1 mix; while the strength of the beams built with the FC2 mix is 14.7% higher (on average). The objective of the research was focused on assessing the energy dissipated by each mix. Therefore, this energy was calculated through the area inside the hysteresis cycles, according to the recommendations in the reference ATC40 (1996), which was designed for non-linear static methodologies.

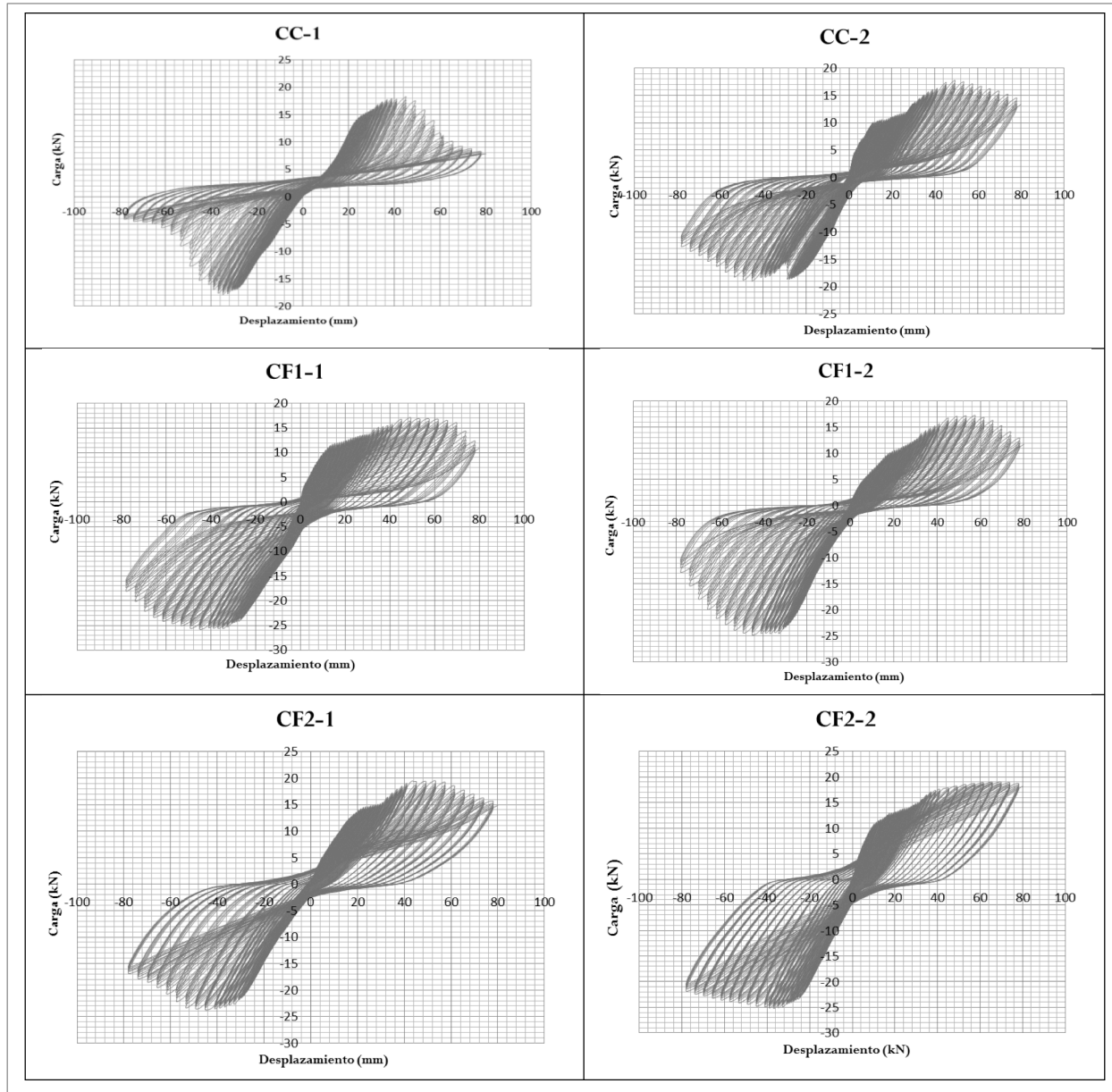


Figura 5. Ciclos de histéresis de las vigas en voladizo ensayadas
Figure 5. Hysteresis cycles of the tested cantilever beams

Para mostrar este punto, en la Figura 6 se resume el cálculo de la energía disipada por cada ciclo de histéresis para diferentes niveles de deriva y para las diferentes probetas. La tendencia inicial del área disipada al interior de los ciclos de histéresis es similar para las 6 probetas, pero cuando empiezan a aparecer las fisuras, a un desplazamiento cercano a los 10 mm, cambia el comportamiento de estas, ya que las fibras empiezan a actuar generando una disipación de energía. Este comportamiento es similar al reportado por Sreeja, M. (2013).

In order to show this point, Figure 6 summarizes the calculation of the energy dissipated by each hysteresis cycle for different drift levels and each cylinder. The initial trend of the area dissipated inside the hysteresis cycles is similar for all 6 beams, but when cracks begin to appear, at a displacement close to 10 mm, their behavior changes, because fibers start generating energy dissipation. This behavior is similar to that reported by Sreeja, M. (2013).

Es clara la tendencia obtenida en donde las dos probetas elaboradas con la misma muestra presentan comportamientos similares entre sí. Las probetas elaboradas con la mezcla CC (CC-1 y CC-2) disiparon un máximo de energía (promedio de las dos probetas) de 350 J para un desplazamiento de 60 mm, siendo esta energía la más baja entre las tres mezclas de concreto evaluadas. Esto era de esperarse, ya que esta mezcla no tiene adición de fibras metálicas.

The trend is clear when both beams built with the same sample present similar behaviors among them. Cylinders built with the CC mix (CC-1 and CC-2) dissipated a maximum energy (average of both cylinders) of 350 J for a displacement of 60 mm, being this energy the lowest among the three evaluated concrete mixes. This was to be expected, since this mix has no metallic fiber addition.

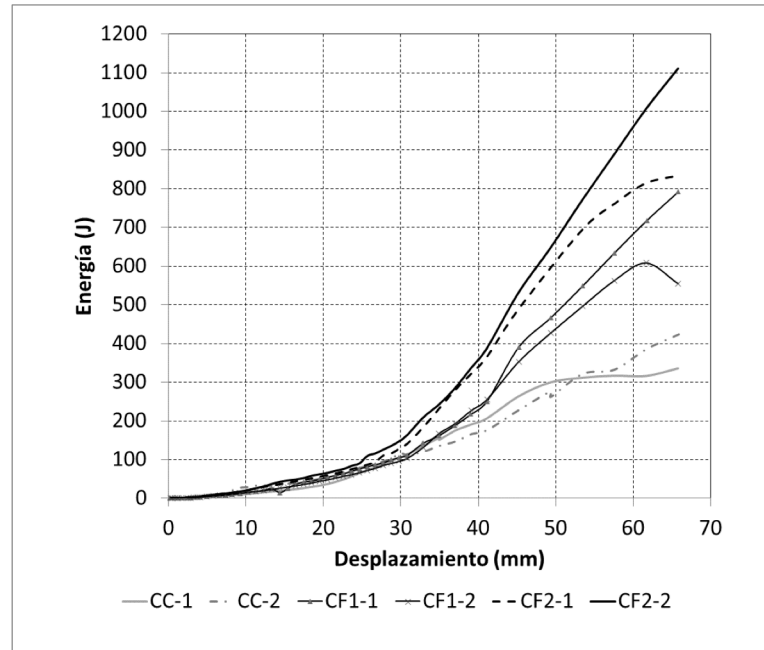


Figura 6. Evolución de la energía disipada de las vigas en voladizo para diferentes niveles de desplazamiento
Figure 6. Evolution of the energy dissipated from the cantilever beams for different displacement levels

La energía promedio disipada por las vigas elaboradas con la mezcla CF1 para 60 mm de desplazamiento fue de 662 J. Esta mezcla tuvo un mejor comportamiento que la de concreto convencional, gracias a que las fibras empezaron a actuar retardando el desarrollo de las fisuras y aumentando el amortiguamiento histerético equivalente del elemento. Este comportamiento y su mayor disipación de energía harían que el desempeño sísmico de pórticos elaborados con esta mezcla fuera superior al de los pórticos construidos con la mezcla CC.

The average energy dissipated from the beams built with the FC1 mix, for a displacement of 60 mm, was 662 J. This mix showed a better behavior than that of conventional concrete, because fibers started to act by delaying cracking and increasing the member's equivalent hysteretic damping. This behavior and the higher energy dissipation seem to imply that the seismic performance of frames built with this mix is better than that of the frames built with the CC mix.

Finalmente, los resultados experimentales sugieren que el desempeño de la mezcla CF2 fue superior al de las mezclas CF1 y CC. La alta capacidad para disipar energía de las vigas elaboradas con la mezcla CF2, con respecto a las otras mezclas, empieza a ser notorio a partir de desplazamientos cercanos a los 30 mm. Estos especímenes con adición de 30 kg/m³ de fibras metálicas, alcanzaron niveles de disipación de energía promedio a los 60 mm de 911 J, lo cual deja en evidencia que las fibras metálicas mejoran el comportamiento de los elementos estructurales sometidos a cargas cíclicas.

Finally, experimental results suggest that the performance of the FC2 mix was better than that of the FC1 and CC mixes. The great capacity to dissipate energy from the beams built with the FC2 mix, in relation to the other mixes, becomes evident as from displacements close to 30 mm. These specimens with 30 kg/m³ metallic fiber addition reached average energy dissipation levels at 60 mm of 911 J, which evidences that metallic fibers improve the behavior of the structural members subjected to cyclic loadings.



Estos resultados de incremento de la cantidad de energía disipada por los concretos con fibras es similar a lo encontrado por Shannag M., Abu-Dyya N., Abu-Farsakh G. (2005) (aunque para concreto de ultra alto desempeño). En dicha referencia se reportan incrementos hasta de 20 veces en la capacidad de disipación de energía al comparar el concreto adicionado con fibras con el concreto sin fibras.

Es importante anotar que a pesar de que los niveles de disipación de energía de las mezclas CF1 y CF2 son un 189% y 260% superior (respectivamente) al de la mezcla CC; esta disipación se presenta con menores niveles de daño y mucha menos fisuración como se observa en la Figura 7. En dicha Figura se presentan los daños en el nudo inferior de las vigas en voladizo ensayadas para diferentes niveles de deriva y para cada una de las tres mezclas bajo estudio.

These results regarding the increase of the amount of energy dissipated by fiber reinforced concrete are similar to the findings of Shannag M., Abu-Dyya N., Abu-Farsakh G. (2005) (although for ultra-heavy-duty concrete). This reference reports increases up to 20 times in the energy dissipation capacity when comparing fiber reinforced concrete with concrete without fibers.

It is worth highlighting that, despite the fact that the energy dissipation levels of the FC1 and FC2 mixes are 189% and 260% higher (respectively) than that of the CC mix, this dissipation presents lower damage levels and much less cracking, as observed in Figure 7. This figure shows the damages in the bottom node of the cantilever beams tested for different drift levels and for all three studied mixes.

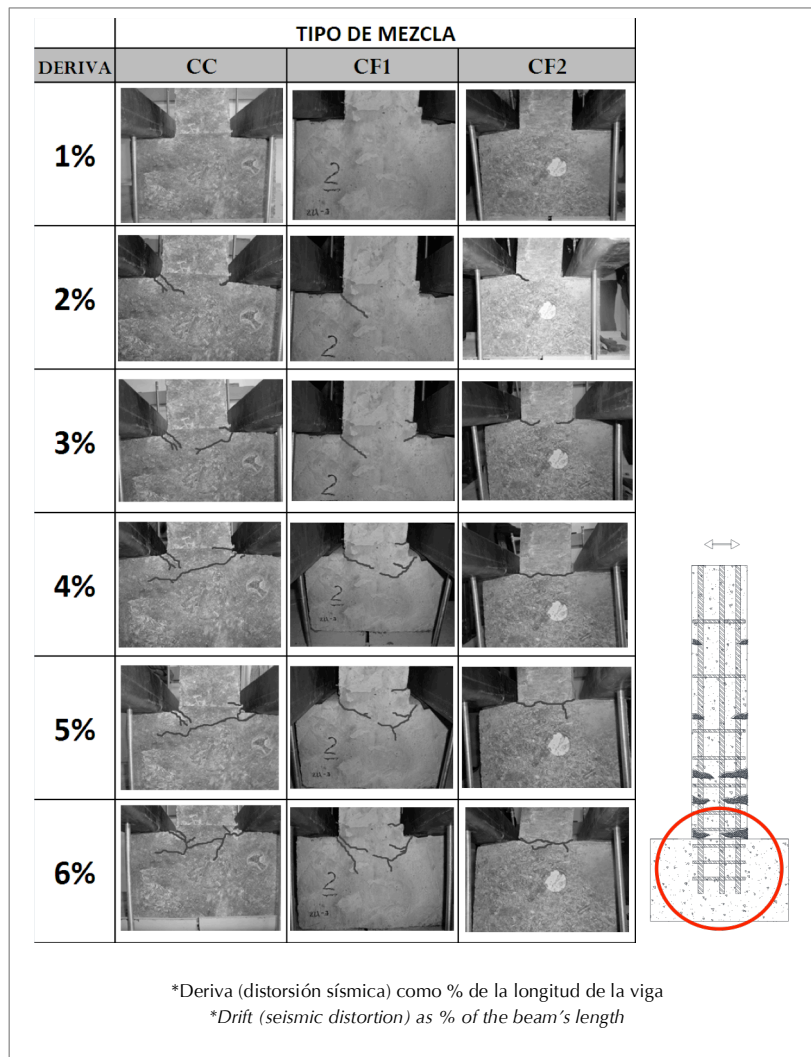


Figura 7. Evolución del daño (fisuración) en las probetas para diferentes niveles de deriva
Figure 7. Evolution of the damage (cracking) in the cylinders for different drift levels

La evidencia experimental indica que la fisuración está relacionada con la cantidad de fibras metálicas adicionadas a la mezcla de concreto. Para las probetas construidas con la mezcla CC, las fisuras empiezan a ser muy pronunciadas desde los 20 mm de desplazamiento, dando como resultado final unos especímenes con gran cantidad de fisuras y grietas. En el caso de las probetas elaboradas con la mezcla CF1, las fisuras iniciaron en desplazamientos cercanos a los 20 mm, propagándose de manera similar a lo que ocurrió con las probetas de la mezcla CC, pero se hicieron más acentuadas a los 30mm. El estado final de los especímenes hechos con la mezcla CF1 fue mucho mejor que los de la mezcla CC, ya que las fibras metálicas lograron disipar más energía y prevenir la formación de fisuras. Finalmente, las probetas hechas con la mezcla CF2, presentaron el nivel de daño más bajo, ya que su alto contenido de fibras metálicas, les permitió disipar más energía y evitar la propagación de las fisuras. El resultado final de los especímenes correspondientes a CF2, fue muy satisfactorio, ya que no quedaron en mal estado como los elaborados con CC.

En términos generales, la Figura 7, muestra una comparación clara entre las vigas elaboradas con las diferentes mezclas. Es posible apreciar que a mayor desplazamiento, mayor número de fisuras en las probetas; pero de igual manera los daños disminuyen, a medida que aumenta la adición de fibras en la mezcla de concreto. Teniendo en cuenta la información anterior es posible concluir que las fibras metálicas contribuyen de manera muy notable a contrarrestar el nivel de daños en vigas en voladizo de concreto reforzado ante movimientos cíclicos como lo son los desplazamientos del terreno con origen sísmico.

4. Conclusiones

- Las fibras metálicas incrementan moderadamente la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del concreto. Para la adición de fibras de 30 kg/m^3 , el aporte de las fibras fue más notorio que para la de 15 kg/m^3 , presentando incrementos del 26% en resistencia a la compresión y de 22% en el módulo de elasticidad con respecto a la mezcla de concreto convencional. Para las probetas elaboradas con la mezcla CF1, la resistencia a la compresión aumentó en un 11% y el módulo de elasticidad fue casi el mismo que para las probetas elaboradas con la mezcla CC.
- La capacidad de disipación de energía se incrementa de manera proporcional al porcentaje de adición de fibras metálicas en las mezclas de concreto. La energía disipada por las probetas elaboradas con la mezcla CF2 fue en promedio 911 J para 60 mm de desplazamiento, mientras que en las probetas de la mezcla CF1 la energía disipada (promedio de las dos probetas ensayadas) no superó los 662 J para el mismo nivel de desplazamiento. Esta energía disipada es muy superior a la energía absorbida por las vigas elaboradas con la mezcla de concreto sin fibras (350 J)

The experimental evidence indicates that cracking is related with the quantity of metallic fibers added to the concrete mix. For the beams built with the CC mix, cracks began to be highly visible as from 20 mm displacements; in the end, the final result are specimens with a great number of cracks. In the case of the cylinders built with the FC1 mix, cracks started at displacements close to 20 mm, spreading in a similar way as the cylinders with the CC mix, but they became bigger at 30 mm. The final condition of the specimens built with the FC1 mix was much better than that of the CC mix, since the metallic fibers were capable of dissipating more energy and prevent cracking. Finally, the beams built with the FC2 mix presented the lowest damage level, because their high content of metallic fibers allowed them to dissipate more energy and prevent the spreading of cracks. The final result of the FC2 specimens was very satisfactory, because they did not end in a bad condition as those built with the CC mix.

In general terms, Figure 7 shows a clear comparison between beams built with the different mixes. It can be observed that the greater the displacement, the higher the number of cracks in the beams; furthermore, damages decrease as the addition of fibers in the concrete mix increases. Keeping this information in mind, it is possible to conclude that metallic fibers contribute in a remarkable way to counteract the damage level in reinforced concrete cantilever beams in the event of cyclic motions like ground displacements during earthquakes.

4. Conclusions

- *Metallic fibers moderately increase the compressive strength and the modulus of elasticity of concrete. When using fiber addition of 30 kg/m^3 , the contribution of fibers was more evident than for the addition of 15 kg/m^3 , with increases of 26% in compressive strength and 22% in the modulus of elasticity, in relation to the conventional concrete mix. For cylinders built with the FC1 mix, the compressive strength increased by 11% and the modulus of elasticity was almost the same than for cylinders built with the CC mix.*
- *The energy dissipation capacity increases proportionally to the percentage of metallic fiber addition in the concrete mixes. The energy dissipated by beams built with the FC2 mix was on average 911 J for a 60 mm displacement, while for the beams of the FC1 mix, the dissipated energy (average of the two tested cylinders) did not exceed the 662 J for the same displacement level. This dissipated energy is much higher than the energy absorbed by the beams built with the concrete mix without fibers (350 J).*



- El nivel de daño en los diferentes tipos de mezclas cambió de manera considerable, teniendo en cuenta el proceso de formación de fisuras, y el resultado final de los especímenes que fueron ensayados. En el caso del concreto convencional, las fisuras en los especímenes aparecieron para desplazamientos menores que las probetas elaboradas con las mezclas CF1 y CF2, y la velocidad de propagación de dichas fisuras fue mucho mayor que para los otros casos. El estado final de las probetas hechas con CC, fue bastante deficiente, ya que el concreto sufrió fuerte descascaramiento especialmente en los lugares cercanos al nodo.
 - Para las probetas hechas con la mezcla CF1, la aparición de las fisuras se dio en desplazamientos similares a los de las vigas hechas con CC, pero la velocidad con que se propagaron las mismas fue menor, dando como resultado final unos especímenes menos fisurados y solo con indicios de descascaramiento del material. Finalmente, en el caso de las vigas hechas con CF2, las fisuras aparecieron a desplazamientos mayores que para los casos anteriores, el estado final de las probetas elaboradas con esta mezcla fue el más satisfactorio, ya que el número de fisuras, la longitud y el espesor de estas fue significativamente menor que en las probetas hechas con las mezclas CC y CF1.
 - Teniendo en cuenta la información anterior es posible concluir que las fibras metálicas contribuyen de manera muy notable a contrarrestar el nivel de daño en vigas en voladizo de concreto reforzado ante movimientos cíclicos. De acuerdo con la evidencia experimental las fibras metálicas confinan el concreto desde la parte central del nodo, controlando el agrietamiento y reduciendo potenciales fallas frágiles. Este comportamiento es deseable en estructuras sismo resistentes.
 - El comportamiento de las vigas en el rango elástico es igual para todas las mezclas, ya que las fibras metálicas empiezan a actuar una vez empiezan a aparecer las fisuras y cuando se alcanza el rango inelástico.
- *The damage level in the different types of mix changed considerably, considering the cracking formation process, and the final result of the tested specimens. In the case of conventional concrete, cracks appeared in the specimens by displacements lower than the beams built with the FC1 and FC2 mixes, and the spreading speed of these cracks was much higher than in the other cases. The final condition of the specimens built with CC was quite deficient, since concrete suffered strong scaling, especially near to the node.*
 - *For beams built with the FC1 mix, cracks appeared by displacements similar to the beams built with CC, but the spreading speed was lower; in the end, specimens had less cracks, just some scaling signals in the material. Finally, in the case of the beams built with FC2, cracks appeared at greater displacements than for the first two cases; the final condition of the specimens built with this mix was the most satisfactory, since the number, length and thickness of the cracks was significantly lower than in the cylinders built with the CC and FC1 mixes.*
 - *Considering the above information, it is possible to conclude that metallic fibers contribute in a remarkable way to counteract the damage level in reinforced concrete cantilever beams in the event of cyclic motions. According to the experimental evidence, metallic fibers confine the concrete from the central part of the node, controlling the cracking and reducing potential brittle failures. This behavior is desirable in earthquake-resistant structures.*
 - *The behavior of the beams in the elastic range is the same for all mixes, since metallic fibers start to act once the cracks begin to appear and when the inelastic range is reached.*

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana por la financiación suministrada para desarrollar el proyecto de investigación que dio origen a los resultados presentados en este artículo. Así mismo desean agradecer al Laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana por la realización del proceso experimental reportado en este documento. Finalmente agradecen a las empresas BEKAERT S.A. y CEMEX Colombia S.A., por el suministro de materiales para el desarrollo de la investigación.

5. Acknowledgement

The authors wish to thank the Vicerectory of Academic Affairs of the Pontificia Universidad Javeriana for the funds granted for the development of the research project that allowed obtaining the results presented in this paper. Likewise, they wish to thank the Laboratory of Tests and Essays of the Department of Civil Engineering of the Pontificia Universidad Javeriana for making the experimental process reported in this document. And finally, they thank the companies BEKAERT S.A. and CEMEX Colombia S.A. for supplying the materials needed for the research.



6. Referencias/References

- Alfonso J.R. y Badillo O.O. (2011)**, Evaluación de la capacidad de disipación de energía de concreto con fibras metálicas y de caucho de desecho de llanta. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) (2010)**, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10). Bogotá, Colombia.
- ATC (Applied Technology Council) (1996)**, ATC40 (1996) Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building Vol. 1. Seismic Safety Commission. California, USA.
- Buyle-Bodin F. y Madhkhani M. (2002)**, Seismic behaviour of steel fibre reinforced concrete piles. *Mat. Struct.* 35, 402–407, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02483143>.
- Cardona L. (2010)**, Concreto con fibras de acero: aplicaciones. ACI Seccional Colombiana. Bogotá, Colombia.
- Ding Y. y Kusterle W., (1999)**, Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests. *Cement and Concrete Research* 29, 1827–1834, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00177-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00177-5).
- Dora A.G.K. y Hamid N.H.A. (2012)**, Seismic Performance of SFRC Beam-Column Joint with Corbel under Reversible Lateral Cyclic Loading. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology* 4, 76–80, doi: <http://dx.doi.org/10.7763/IJET.2012.V4.332>.
- EFNARC (1996)**, European specification for sprayed concrete. Apartado 10.3.
- G. Kotsovos, C. Zeris y M. Kotsovos (2007)**, The effect of steel fibres on the earthquake-resistant design of reinforced concrete structures, *Materials and Structures*, 40(2):175-188.
- Ganesan N., Indira P. y Abraham R. (2007)**, Steel fibre reinforced high performance concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. *ISET Journal of Earthquake Technology*, Vol. 44, No. 3-4, Sept.-Dec. 2007, pp. 445–456
- Holschemacher, K., Mueller T. y Ribakov Y. (2010)**, Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials & Design*, 31(5): 2604-2615, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>.
- K. Ramadevi, D.L.Venkatesh Babu y R. Venkatasubramani (2013)**, Seismic Behaviour of Hybrid Fibre Reinforced Concrete Bare Frames, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*. Vol. 5 No. 5 3977-3985
- ICONTEC. NTC33. Norma Técnica Colombiana (1997)**, Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato de Blaine de permeabilidad al aire.
- ICONTEC. NTC4025. Norma Técnica Colombiana (2006)**, Concretos. Método de ensayo para determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a la compresión.
- ICONTEC. NTC673. Norma Técnica Colombiana (2010)**, Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.
- Ioan Olariu A. M. (1992)**, Seismic Behaviour of Steel Fiber Concrete Beam-Column, Tenth World Conference on Earthquake Engineering.
- Imbsen y Associates Inc. & Chadwell C. XTRACT v. 3.0.4. (2005)**, Cross Section analysis program for structural engineers.
- Marmol P. (2010)**, Hormigones con Fibras de Acero. Características Mecánicas. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Meyer C. (2009)**, The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites* 31, 601–605, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.
- Nataraja M.C., Dhang N. y Gupta A.P. (2000)**, Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cement and Concrete Research* 30, 593–597, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00212-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00212-X).
- Shakya K., Watanabe K., Matsumoto K. y Niwa J. (2012)**, Application of steel fibers in beam-column joints of rigid-framed railway bridges to reduce longitudinal and shear rebars. *Construction and Building Materials* 27, 482–489.
- Shannag M., Abu-Dyya N. y Abu-Farsakh G. (2005)**, Lateral load response of high performance fiber reinforced concrete beam-column joints. *Construction and Building Materials*, Volume 19, Issue 7, September 2005, Pages 500-508.
- Sreeja M.D. (2013)**, Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Beam under Cyclic Loading. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Volume 6, Issue 3 (May. - Jun. 2013). Pp 01-04.

